

UNIwersytet
Technologiczno-Przyrodniczy
Im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich
w Bydgoszczy



Wydział Budownictwa,
Architektury
i Inżynierii Środowiska



ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Szymon Topoliński

**BADANIE WYTRZYMAŁOŚCI KOMPOZYTÓW
GRUNT ORGANICZNY-SPOIWO CEMENTOWE
FORMOWANYCH METODĄ MIESZANIA**

PROMOTOR

DR HAB. INŻ. MACIEJ KORDIAN KUMOR, PROF. NADZW. UTP

**BYDGOSZCZ
2014**

Praca powstała przy wsparciu projektu
„Realizacja II etapu Regionalnego Centrum Innowacyjności”
współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego
w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego
Województwa Kujawsko-Pomorskiego na lata 2007-2013

SPIS TREŚCI

WAŻNIEJSZE OZNACZENIA STOSOWANE W PRACY.....	7
1. WPROWADZENIE.....	9
1.1. WSTĘP	9
1.2. LITERATURA W ZAKRESIE TEMATYKI PRACY	10
1.3. GRUNTY ORGANICZNE.....	12
1.3.1. Charakterystyka ogólna	12
1.3.2. Substancja organiczna	12
1.3.3. Klasyfikacja gruntów organicznych	16
1.4. TORFY	19
1.4.1. Charakterystyka i geneza.....	19
1.4.2. Występowanie w Polsce	20
1.4.3. Klasyfikacja torfowisk i torfów	21
1.4.4. Właściwości i budowa torfu	23
1.5. OCENA GRUNTÓW ORGANICZNYCH JAKO PODŁOŻA BUDOWLANEGO.....	24
1.6. METODY WZMACNIANIA PODŁOŻY ORGANICZNYCH W GEOTECHNICE.....	25
1.7. TECHNOLOGIA MIESZANIA GRUNTÓW <i>IN SITU</i>	27
1.7.1. Zagadnienia ogólne.....	27
1.7.2. Wybrane metody mieszania gruntów <i>in situ</i>	30
1.7.3. Stosowane spoiwa i dodatki	33
1.7.4. Standardowe badania sprawdzające	38
1.7.5. Laboratoryjne badania wytrzymałości kompozytu na jednoosiowe ściskanie.....	39
1.8. WPŁYW SUBSTANCJI ORGANICZNEJ NA WYTRZYMAŁOŚĆ KOMPOZYTU	42
1.9. TEZA PRACY	43
1.10. CEL PRACY	44
1.11. ZAKRES PRACY	44
2. IDENTYFIKACJA BADANEGO GRUNTU	46
2.1. POCHODZENIE MATERIAŁU BADAWCZEGO	46
2.1.1. Charakterystyka ogólna miejsca pobrania	46
2.1.2. Budowa geologiczna.....	47
2.2. ANALIZA MAKROSKOPOWA I MIKROSKOPOWA.....	50
2.3. WYNIKI BADAŃ OKREŚLONYCH <i>IN SITU</i>	50
2.4. WYNIKI BADAŃ ZAWARTOŚCI SUBSTANCJI ORGANICZNEJ	52
2.5. PODSTAWOWE CECHY FIZYKOCHEMICZNE GRUNTU	52
2.6. ANALIZA DERYWATOGRAFICZNA	54

2.7. CHARAKTERYSTYKA MATERIAŁU BADAWCZEGO NA PODSTAWIE PRZEPROWADZONYCH BADAŃ.....	57
3. METODYKA BADAŃ KOMPOZYTU	58
3.1. PROGRAM METODYKI BADAŃ	58
3.2. WYBÓR SPOIWA DO STABILIZACJI	59
3.3. ZAŁOŻENIA DO METODYKI BADAŃ.....	60
3.4. PROJEKTOWANIE SKŁADU MIESZANKI	61
3.5. SPOSÓB PRZYGOTOWANIA I DOJRZEWANIA PRÓBEK.....	63
3.5.1. Próbki cylindryczne	63
3.5.2. Próbki sześciennie.....	64
4. BADANIA KOMPOZYTU.....	66
4.1. LABORATORYJNE BADANIA WYTRZYMAŁOŚCI KOMPOZYTU NA JEDNOOSIOWE ŚCISKANIE.....	66
4.1.1. Opis aparatury i stanowiska pomiarowego	66
4.1.2. Metoda pomiaru	67
4.1.3. Określenie wytrzymałości próbek kompozytu.....	68
4.1.4. Zestawienie wyników badań.....	71
4.1.5. Analiza statystyczna wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie....	86
4.1.6. Wnioski podsumowujące badania wytrzymałości kompozytu ...	98
4.2. BADANIE ODCZYNU pH KOMPOZYTU.....	100
4.2.1. Wprowadzenie	100
4.2.2. Opis aparatury i stanowiska pomiarowego	100
4.2.3. Metoda pomiaru	101
4.2.4. Przygotowanie próbek	101
4.2.5. Wyniki i analiza badań.....	102
4.3. OKREŚLENIE ZAWARTOŚCI WYBRANYCH SKŁADNIKÓW ORGANICZNYCH KOMPOZYTU	104
4.3.1. Wprowadzenie	104
4.3.2. Opis aparatury i stanowiska pomiarowego	104
4.3.3. Metoda pomiaru	105
4.3.4. Przygotowanie próbek	105
4.3.5. Wyniki i analiza badań.....	105
4.4. ANALIZA TOMOGRAFICZNA	107
4.4.1. Wprowadzenie	107
4.4.2. Opis aparatury i stanowiska pomiarowego	108
4.4.3. Metoda pomiaru i podstawy działania	110
4.4.4. Przygotowanie próbek	111
4.4.5. Wyniki i analiza badań.....	111

4.5. ANALIZA MIKROSTRUKTURY KOMPOZYTU ZA POMOCĄ ELEKTRONOWEGO MIKROSKOPU SKANINGOWEGO (SEM)....	116
4.5.1. Wprowadzenie	116
4.5.2. Opis aparatury i stanowiska pomiarowego	117
4.5.3. Przygotowanie próbek do badań	118
4.5.4. Wyniki i analiza badań.....	120
5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI	125
5.1. PODSUMOWANIE	125
5.2. WNIOSKI Z BADAŃ	131
5.3. KIERUNEK DALSZYCH BADAŃ	133
LITERATURA	134
KSIĄŻKI, SKRYPTY	134
ARTYKUŁY I ROZPRAWY NAUKOWE	136
NORMY I SPECYFIKACJE TECHNICZNE.....	140
STRONY INTERNETOWE.....	141
INNE.....	141
SPIS RYSUNKÓW	142
SPIS TABEL	147
SPIS ZAŁĄCZNIKÓW	149

WAŻNIEJSZE OZNACZENIA STOSOWANE W PRACY

c_u	–	spójność – [kPa],
C	–	zawartość cementu w kompozycie – [kg/m ³],
C_{org}	–	zawartość węgla organicznego ogółem – [%],
$C_{org f}$	–	zawartość węgla organicznego w kwasach fulwowych – [%],
$C_{org h}$	–	zawartość węgla organicznego w kwasach huminowych – [%],
e	–	wskaźnik porowatości – [1],
f_{ck}	–	charakterystyczna wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie – [kPa],
I_c	–	wskaźnik konsystencji – [1],
I_L	–	stopień plastyczności – [1],
I_{om}	–	zawartość substancji organicznej – [%],
I_p	–	wskaźnik plastyczności – [1],
K1-K20	–	kompozyt 1-20,
m_c/m_s	–	stosunek masy cementu do suchej masy gruntu – [1],
M	–	moduł odkształcenia – [MPa],
M_7	–	moduł odkształcenia po 7 dniach dojrzewania – [MPa],
M_{28}	–	moduł odkształcenia po 28 dniach dojrzewania – [MPa],
n	–	porowatość – [1],
P	–	zawartość piasku kwarcowego w kompozycie – [kg/m ³],
r	–	współczynnik korelacji – [1],
r^2	–	współczynnik determinacji – [1],
V_s	–	współczynnik zmienności – [%],
w/c	–	stosunek masy wody do masy cementu – [1],
w_n	–	wilgotność naturalna – [%],
w_L	–	granica płynności – [%],
w_p	–	granica plastyczności – [%],
Q_f	–	umowny graniczny opór penetracji – [kPa],

- α – *cement factor* – [kg/m³],
- Δ – przyrost,
- ε – odkształcenie [1],
- ρ – gęstość objętościowa – [Mg/m³],
- ρ_d – gęstość objętościowa szkieletu gruntowego – [Mg/m³],
- ρ_s – gęstość właściwa – [Mg/m³],
- σ – naprężenie – [kPa],
- σ_1 – naprężenie osiowe normalne – [kPa],
- σ_3 – naprężenie boczne – [kPa],
- σ_7 – wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie po 7 dniach dojrzewania – [kPa],
- σ_{28} – wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie po 28 dniach dojrzewania – [kPa],
- ϕ_u – kąt tarcia wewnętrznego – [°],

1. WPROWADZENIE

1.1. WSTĘP

Szybki rozwój budownictwa stawia przed geotechniką nowe wyzwania. Zmniejsza się dostępność terenów o korzystnych warunkach geologiczno-inżynierskich. Coraz częściej na potrzeby budownictwa muszą być zagospodarowane tereny, na których jeszcze do niedawna fundamentowanie było niemożliwe lub nieuzasadnione ekonomicznie. Posadawianie obiektów inżynierskich w trudnych warunkach, szczególnie na gruntach słabych, staje się więc koniecznością. Za grunty słabe uważa się przede wszystkim młode, nieskonsolidowane utwory organiczne. Niska wytrzymałość, duża ściśliwość i związane z nimi nieprzewidywalne różnice osiadania, dyskwalifikują podłoże organiczne jako stabilne i nośne. Grunty te występują stosunkowo powszechnie w Polsce. Pomimo pojawiających się opracowań podejmujących tematykę słabonośnych podłoży organicznych [6] ich właściwości fizyczno-mechaniczne, w szczególności zależności pomiędzy poszczególnymi parametrami nie zostały jak dotąd dokładnie rozpoznane.

W przypadku konieczności posadowienia obiektu inżynierskiego na rodzimym, podłożu organicznym wymagane jest zastosowanie specjalistycznych zabiegów wzmacniających. Zwykle, w takich przypadkach najczęściej stosowana jest wymiana gruntu lub fundamenty pośrednie (np. pale) [17]. Metody te wiążą się zawsze ze znaczną ingerencją ciężkiego, specjalistycznego sprzętu w środowisko naturalne, zastosowaniem znacznej liczby materiałów mineralnych, co oznacza relatywnie wysokie koszty. Alternatywą wobec tradycyjnych sposobów posadowienia na organicznych gruntach słabonośnych, przyjazną dla środowiska, stają się metody bezpośredniej modyfikacji właściwości mechanicznych podłoża w warunkach *in situ*. Do takich należy między innymi metoda wglębnego mieszania gruntu DSM (z ang. *Deep Soil Mixing*), DMM (z ang. *Deep Mixing Method*). Metody te mają poprawiać odkształceniowe i wytrzymałościowe parametry geotechniczne. Znajdują one szerokie zastosowanie w inżynierii lądowej ze względu na prostotę wykonania i niski koszt realizacji w porównaniu z innymi metodami modyfikacji podłoża. Umożliwiają one wykorzystanie odpadów przemysłowych takich jak popioły lotne czy żużel wielkopiecowy.

Zastosowanie metody wglębnego mieszania jest rozwiązaniem skutecznym i przyjaznym środowisku (brak jest odpadów technologicznych). Warunkiem efektywnej stabilizacji jest odpowiedni dobór rodzaju i racjonalne zaprojektowanie udziału spoiwa w powstałym kompozycie. Relacje między składnikami powinny wynikać z analizy rozpoznania terenu, oceny warunków wodno-gruntowych, badań laboratoryjnych gruntu budującego szkielet kompozytu, a także uwzględniać wymogi technologii mieszania gruntu *in situ*.

Cement jest najczęściej stosowanym i powszechnym spoiwem hydraulicznym używanym do wzmocnienia gruntów organicznych. Jego zastosowanie

możliwe jest praktycznie dla każdego gruntu i poprawia jego parametry geotechniczne. Jak pokazują wyniki badań, cement z granulowanym żużlem wielkopieczowym, jak i sam cement daje najlepszy efekt wzmocnienia wysokoorganicznych gruntów słabonośnych [53].

Koniecznym etapem stabilizacji podłoża organicznego są laboratoryjne badania wytrzymałości kompozytu. Wartości uzyskane w takich warunkach odbiegają od wytrzymałości poligonowych ze względu na stosowane warunki mieszania i dojrzewania, ale pozwalają ocenić wpływ stosownych spoiw na poprawę właściwości ulepszanego gruntu organicznego. Jest to niezwykle pomocne przy weryfikacji i projektowaniu właściwego składu kompozytu grunt-spoivo stosowanego w warunkach *in situ*.

W celu przybliżenia poruszanych zagadnień w rozdziale tym przedstawiono wyniki studiów literaturowych w zakresie tematyki prowadzonych badań. Szczególną uwagę poświęcono gruntom organicznym oraz metodom ich wzmacniania za pomocą metod mieszania gruntów *in situ*.

1.2. LITERATURA W ZAKRESIE TEMATYKI PRACY

Metody mieszania gruntu *in situ* są stosunkowo młodymi i szybko rozwijającymi się technologiami modyfikacji podłoża. Ich rozwój wiąże się z poszukiwaniem sposobu na zwiększenie wydajności i skuteczności wzmocnienia przy jednoczesnym obniżeniu kosztów. Jest to możliwe dzięki badaniom, w tym również laboratoryjnym, które pozwalają na małym modelu, wstępnie prognozować skuteczność wzmocnienia ulepszanego gruntu. W rozwoju stabilizacji słabonośnych podłoży organicznych przodują kraje skandynawskie, przede wszystkim Szwecja i Finlandia, gdzie występuje stosunkowo dużo tego typu gruntów. Stabilizacją takich gruntów jak, dy czy gytia zajmowali się w ostatnich latach między innymi autorzy prac [50, 53], natomiast stabilizacją torfu publikacje [50, 53, 67, 73, 74, 75, 80, 103].

Większość prowadzonych dotychczas badań miało na celu dobranie odpowiedniego rodzaju i udziału stabilizatora do wzmocnienia danego, słabonośnego gruntu organicznego lub określenia wpływu wybranego parametru na końcową wytrzymałość kompozytu. Niestety, określone w ten sposób zależności są słuszne tylko dla zastosowanego do badań gruntu organicznego. Odczuwa się brak prac określających związek między parametrami mechanicznymi kompozytu a właściwościami geotechnicznymi i zawartością jego poszczególnych składników, zwłaszcza substancji organicznej. Do nielicznych należą takie prace, jak [101], opisujące wpływ wybranych związków wchodzących w skład substancji organicznej na proces wiązania i końcową wytrzymałość kompozytu. Badania mieszanek o zmiennym udziale stabilizatora oraz składników organicznych umożliwiają właściwe zrozumienie procesu wzmacniania słabonośnych podłoży organicznych i zastosowanie tej wiedzy w projektowaniu nowych kompozytów.

Od końca lat 90. XX wieku obserwuje się znaczny wzrost liczby publikacji poruszających zagadnienia związane z laboratoryjnymi badaniami wytrzymałości. Zauważono, że dużym problemem jest brak zunifikowanego podejścia do sposobu przeprowadzania badań, metody formowania i warunków dojrzewania, które w przypadku gruntów organicznych mają wpływ na wartości ich parametrów fizykochemicznych i mechanicznych. Porównywanie ze sobą wyników badań próbek przygotowanych w różnych warunkach jest pozbawione sensu, ze względu na zbyt dużą ilość zmiennych związanych z przygotowaniem kompozytów. Najbardziej udaną próbą zunifikowania sposobu formowania, warunków dojrzewania oraz sposobu przeprowadzenia badań sprawdzających skuteczność wzmocnienia jest projekt EuroSoilStab [104]. Mimo że jest to jak dotąd najbardziej kompletna specyfikacja tego typu to według autora nie obejmuje wszystkich czynników mogących mieć wpływ na końcową wytrzymałość kompozytu. Nie uwzględnia się na przykład: rodzaju urządzenia mieszającego, prędkości obrotowej i przesuwu mieszadła, kształtu mieszadła czy dokładnego czasu trwania procesu mieszania. Krajami przodującymi w laboratoryjnych badaniach wytrzymałości kompozytów gruntowych są Szwecja i Finlandia bazujące na własnych wieloletnich doświadczeniach. Tematykę standardowych badań sprawdzających skuteczność wzmocnienia oraz laboratoryjnych metod badania ich wytrzymałości szerzej przedstawiono w punkcie 1.7.4. i 1.7.5.

W ostatnich latach do najczęściej poruszanych zagadnień związanych ze wzmacnianiem słabonośnych gruntów organicznych metodami mieszania gruntu *in situ* należały między innymi:

- rodzaj i udział zastosowanego spoiwa [50, 53, 67, 73, 74, 75, 103],
- wykorzystanie materiałów odpadowych do stabilizacji gruntów [50, 53],
- wpływ wybranych składników substancji organicznej na końcową wytrzymałość kompozytu [101],
- wpływ dodatków chemicznych na wzrost wytrzymałości kompozytu [58, 80, 103],
- wpływ użycia włókien polipropylenowych jako zbrojenia na wzrost wytrzymałości kompozytu: [74, 75],
- wpływ pH na wytrzymałość kompozytu [76, 101],
- wpływ wilgotności kompozytu na jego wytrzymałość [75],
- wpływ czasu dojrzewania na wytrzymałość kompozytu [73, 90, 97],
- wpływ obciążenia w czasie dojrzewania na wytrzymałość kompozytu [50, 51, 90],
- warunki dojrzewania kompozytu [53, 73, 90],
- sposób i czas mieszania kompozytu [90],
- kształt i wielkość próbek [79, 90],
- analiza mikrostruktury kompozytu gruntowego za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego [76, 84].

Należy wspomnieć o znaczących polskich pracach, w których przedstawiono problematykę wzmacniania gruntów metodami mieszania gruntów *in situ*, w tym również organicznych. Prof. dr hab. inż. Michał Topolnicki opr-

cował technologię dostosowaną do rodzaju gruntu i warunków geotechnicznych podłoża. Jest on autorem wielu prac, między innymi [45, 98, 99, 100]. W ostatnim czasie ukazały się prace i rozprawy doktorskie zgłębiające tematykę wzmacniania słabonośnych podłoży metodami mieszania z wykorzystaniem różnych spoiw, np. [64, 79]. Szczególnie ostatnia praca zwraca uwagę szerokim ujęciem problemów i porównaniem modelu laboratoryjnego z warunkami rzeczywistymi oraz ze względu na zakres przeprowadzonych badań.

1.3. GRUNTY ORGANICZNE

1.3.1. Charakterystyka ogólna

Organicznym nazywamy grunt powstały w wyniku naturalnych procesów geologicznych, który w swoim składzie oprócz fazy mineralnej zawiera substancję organiczną. Powszechnie stosowana norma budowlana PN-86/B-02480 [106] określa grunt organiczny jako: *grunt rodzimy, w którym zawartość części organicznych Iom jest większa od 2%*. Europejska Norma EN ISO 14688-2 [110] mająca status Polskiej Normy również przyjmuje za graniczną, odróżniającą ją od gruntów mineralnych, zawartość substancji organicznej równą 2%.

Właściwości chemiczne, fizyczne i mechaniczne oraz struktura gruntów organicznych są ściśle związane z zawartą w nich substancją organiczną. Jej obecność ma zdecydowanie niekorzystny wpływ na parametry geologiczno-inżynierskie. Dodatkowo obserwowana jest duża zmienność tych parametrów nawet w obrębie jednego typu genetycznego. Wynika ona z charakterystycznych dla danego środowiska, zróżnicowanych warunków osadzania się substancji organicznej. Skutkuje to koniecznością wykonywania pełnych badań laboratoryjnych przy określaniu przydatności tego typu gruntów jako podłoża budowlanego [31].

Charakterystyka i właściwości substancji organicznej zostaną dokładnie omówione w punkcie 1.3.2.

1.3.2. Substancja organiczna

Substancja organiczna jest niejednorodną chemicznie mieszaniną składającą się z wielu substancji bardziej lub mniej złożonych, w różnym stopniu rozkładu. Jest głównym składnikiem gleb i gruntów organicznych. W jej skład wchodzi obumarłe części roślin i zwierząt oraz produkty ich rozkładu. Zdecydowanie dominującym źródłem tej substancji są obumarłe części roślin wyższych. Dokładne wydzielenie poszczególnych składników, jak również odróżnienie tych nierozłożonych od całkowicie zmumifikowanych jest praktycznie niemożliwe. Wynika to z ciągle zachodzących w niej procesów i występowania wielu form przejściowych pomiędzy poszczególnymi składnikami. O złożoności tej substancji świadczy fakt, iż do dziś nie ma dokładnej definicji substancji organicznej i próchnicy (humusu) [12]. W Polsce przyjęło się odróżniać nierozłożone części organiczne od bezpostaciowej substancji koloidalnej – próchnicy. Stanowi ona od 80 do 90% substancji organicznej [31].

W zależności od materiału wyjściowego (szaty roślinnej) i warunków bioekologicznych substancja organiczna może ulec mineralizacji lub humifikacji. Zwykle od 75 do 80% tej substancji ulega mineralizacji, a od 20 do 25% humifikacji [12].

Mineralizacja to proces przeobrażenia substancji organicznej w mineralną. W zależności od warunków w procesie mineralizacji, a szczególnie dostępu tlenu może zachodzić butwienie i gnicie. Mineralizacja w warunkach tlenowych nosi nazwę butwienia i w wyniku tych procesów tworzą się takie związki, jak: CO_2 , H_2O , H_2O_2 , SO_4^{3-} , PO_4^{3-} i NO^{3-} . W warunkach beztlenowych natomiast zachodzą procesy gnicia. W odróżnieniu od butwienia procesy te powstają w wilgotnym i kwaśnym środowisku oraz w znacznie niższej temperaturze. Oprócz CO_2 i H_2O , produktami gnicia są między innymi: CH_4 (metan), H_2S (siarkowodór), CS_2 (skaltol) [47]. Szybkość rozkładu składników substancji organicznej zależy od ich wyjściowego składu chemicznego. Wraz ze wzrostem zawartości ligniny i stopnia polimeryzacji celulozy proces rozkładu staje się wolniejszy. Najszybciej rozkładają się cukry, skrobia i białka proste, a najtrudniej i najwolniej takie związki, jak celuloza, lignina, tłuszcze i woski [12].

Humifikacja jest procesem znacznie bardziej skomplikowanym od mineralizacji. Obejmuje ona szereg nie do końca poznanych procesów rozkładu, przebudowy i syntezy związków organicznych prowadzących do powstania próchnicy [47]. Szczególny wkład w procesy jej powstawania przypisuje się działalności mikroorganizmów. Istnieje szereg hipotez dotyczących tworzenia się substancji humusowych. Niezależnie od przyjętej wersji szczególną rolę w ich powstawaniu pełnią fenole, będące głównym składnikiem lignin oraz złożonych aromatycznych związków flawonowych [87]. Ze względu na złożoność tych procesów i małe znaczenie dla niniejszej pracy pominięto ich dokładny opis.

Próchnica to niejednorodna, bezpostaciowa mieszanina koloidów organicznych. W budowie przypomina minerały ilaste. Jest ujemnie naładowaną cząstką otoczoną rojem zaadsorbowanych kationów. Źródłem ładunków ujemnych są grupy karboksylowe ($-\text{COOH}$) i fenolowe ($>\text{OH}$), gdzie wodór może być zastąpiony innym kationem wymiennym. Od minerałów ilastych próchnica różni się zupełnie odmiennym składem chemicznym i brakiem budowy krystalicznej, jest amorficzna. W jej składzie dominuje przede wszystkim węgiel, wodór i tlen [47]. Są to przeważnie związki aromatyczne o kwaśnym odczynie, charakteryzujące się hydrofilnością, wysoką pojemnością wodną, zdolnościami sorpcyjnymi oraz masą cząsteczkową wahającą się od kilkuset do kilku tysięcy [39]. Zdolność pochłaniania różnych jonów i cząstek przez próchnicę ma bardzo duży wpływ na jej właściwości. Pochłanianie kationów Ca^{2+} i Mg^{2+} nieodwracalnie powoduje utratę zdolności hydrofilnych, utrwalając strukturę, natomiast wysycenie kationami jednowartościowymi, takimi jak: K^+ , Na^+ , NH_4^+ powoduje zwiększenie hydrofilności, pogarszając przy tym właściwości fizyczne [47]. Wysoką aktywność chemiczną próchnicy i omówione wyżej zdolności powodują, że substancja ta ma znaczną wodochłonność i niską wodoprzepuszczalność. Już jej niewielka zawartość może znacznie zmienić właściwości grun-

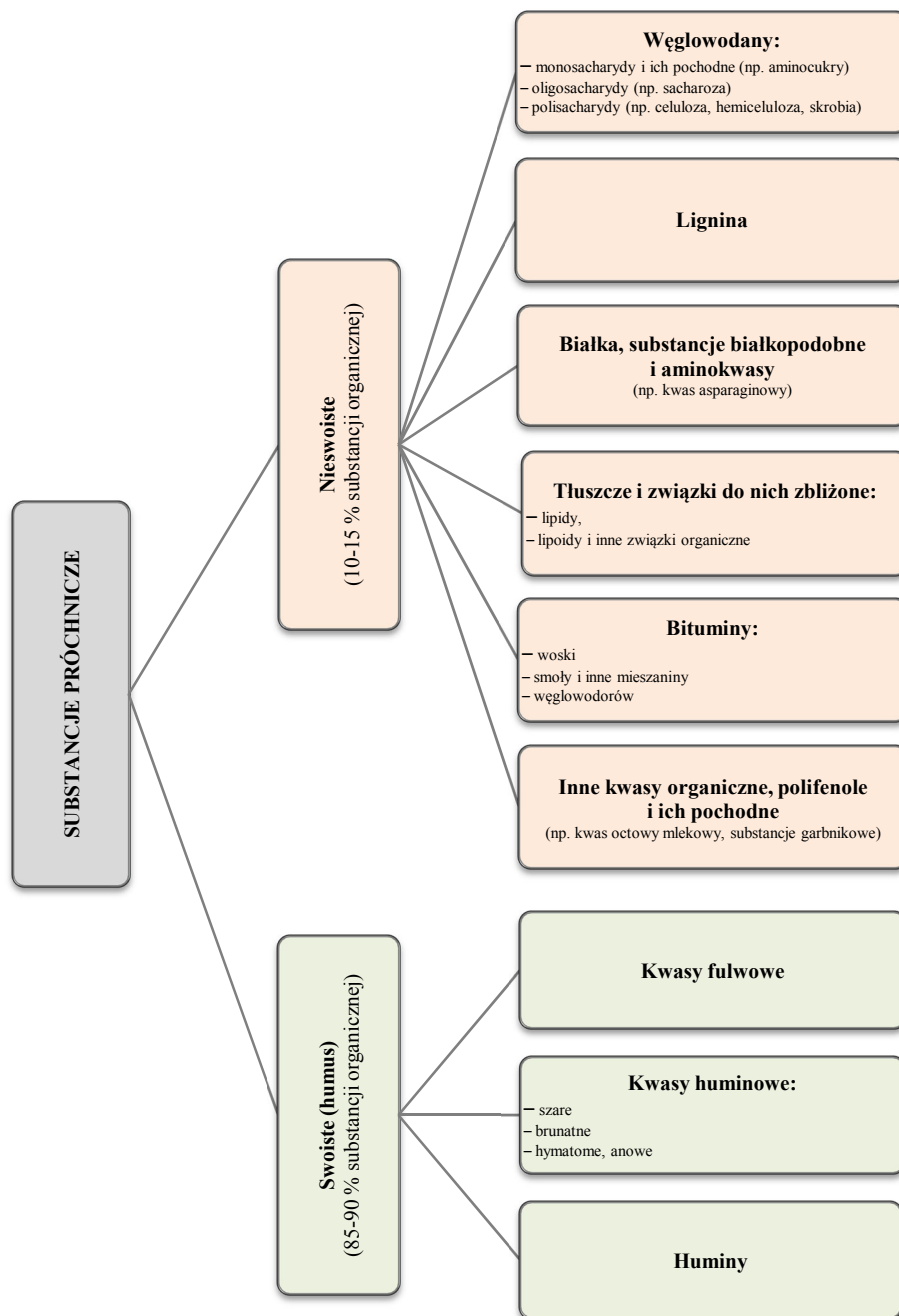
tu, którego jest składnikiem. Obecność zaledwie kilku procent humusu w gruncie obniża kilkaset razy jego wodoprzepuszczalność, a jego obecność w piaskach powoduje ich wodoodporność [15].

W gleboznawstwie organiczne związki próchnicze dzieli się na swoiste i nieswoiste. Do nieswoistych zalicza się znane z chemii organicznej związki będące produktami rozkładu resztek organicznych i związków stanowiących produkt działalności mikroorganizmów. Są to między innymi białka, tłuszcze, węglowodory, ich pochodne oraz wiele innych związków organicznych. Większa część substancji organicznej stanowią swoiste substancje próchnicze zwane próchnicą właściwą – humusem [12]. Niejednorodna budowa i zróżnicowane właściwości wymuszają podział tej substancji na frakcje w zależności od rozpuszczalności w różnych roztworach i ich barwy. Podział ten często uważany jest za sztuczny, ponieważ nie jest możliwe określenie ścisłych granic pomiędzy poszczególnymi frakcjami. Zwykle w przyrodzie występują jako mieszaniny oraz istnieje ich wiele form pośrednich. Jednym z istotniejszych parametrów jest stosunek kwasów huminowych do fulwowych [47].

Schemat podziału substancji próchnicznych przedstawiono na rysunku 1. W dalszej części pracy dokładnie opisane zostaną tylko wybrane frakcje swoistej substancji próchniczej, ze względu na jej wysoką aktywność chemiczną i duże znaczenie w części badawczej niniejszej pracy.

Kwasy fulwowe są to związki o heterogenicznej, ale o stosunkowo prostej budowie i niskiej masie cząsteczkowej. Są łatwo rozpuszczalne w wodzie, alkoholu, alkaliach i kwasach mineralnych, dzięki czemu są bardzo ruchliwe i łatwo się przemieszczają. Ze względu na większą zawartość grup karboksylowych o kwaśnym charakterze są bardziej utlenione od innych związków próchnicznych. Charakteryzują się jasnym, żółtym (kwasy krenowe) lub żółtobrunatnym (kwasy apokrenowe) zabarwieniem. Uważa się, że kwasy fulwowe w odpowiednich warunkach bioekologicznych mogą przekształcić się w kwasy huminowe [12]. W ich składzie elementarnym wyróżnia się średnio: 46% C, 48% O, 4% H, 2% N [26].

Kwasy huminowe są rozpuszczalnymi w alkaliach, strukturotwórczymi związkami polimerycznymi o wysokiej masie cząsteczkowej. Mikrostrukturalnie zbudowane są z dobrze wykształconego jądra aromatycznego, mostków łańcuchowych i grup funkcyjnych zawierających tlen (np. karboksylowe, hydroksylowe, fenolowe, alkoholowe, metoksylowe, karbonylowe). Obecność mostków łańcuchowych powoduje, że mają one budowę porowatą. Dzięki temu, kwasy te mają znacznie większą hydrofilność i pojemność sorpcyjną niż kwasy fulwowe. W zależności od rodzaju mają barwę od szaroczarnej (kwasy huminowe szare) do brunatnej (kwasy huminowe brunatne). Wśród kwasów huminowych można wydzielić mniej kwaśne, bogatsze w azot, wrażliwe na elektrolity szare kwasy huminowe, kwaśne, uboższe w azot brunatne kwasy huminowe i rozpuszczalne w alkoholach kwasy hymatomelanowe [12]. W ich składzie elementarnym wyróżnia się średnio: 54% C, 37% O, 5% H, 4% N [26].



Rys. 1. Podział organicznych związków próchnicznych [12,31]

Huminy są najmniej poznanymi swoistymi związkami próchnicznymi. Pod względem chemicznym przypominają kwasy huminowe, ale są całkowicie nierozpuszczalne w alkaliach, co tłumaczy się ich trwałym związkiem z mineralną częścią gleby. Są to związki o małej aktywności fizykochemicznej [12].

1.3.3. Klasyfikacja gruntów organicznych

Istnieje wiele klasyfikacji gruntów organicznych. Kryterium podziału zależy przede wszystkim od ich przeznaczenia. W normach budowlanych za podstawę podziału przyjmuje się przede wszystkim zawartość materii organicznej i genezę jej powstania. Cechy te mają największy wpływ na właściwości fizyczno-mechaniczne.

Polska norma budowlana [106] dzieli grunty ze względu na genezę powstania, pomijając natomiast zawartość substancji organicznych. Z kolei obowiązująca norma [110] klasyfikuje grunty ze względu na zawartość części organicznych, a same grunty organiczne dzieli na podstawie rodzaju i stopnia rozłożenia tworzącej je substancji organicznej [106, 109]. Porównanie klasyfikacji gruntów organicznych wraz z ich opisami według stosowanych w Polsce norm budowlanych przedstawiono w tabeli 1, a podział gruntów ze względu na zawartość substancji organicznej według [110] w tabeli 2.

W części opracowań naukowych między innymi [32] można spotkać się z opinią, że podziały proponowane inżynierom przez normy budowlane są niepełne. Według [31] do oceny i klasyfikacji słabonośnych gruntów organicznych powinno się określić ich genezę, a w obrębie tak wydzielonych grup dzielić je ze względu na zawartość substancji organicznych i ich charakterystycznych cech.

Z powodu pokrewieństwa gleboznawstwa z gruntoznawstwem przedstawiono również wybrane klasyfikacje gleb. Każdą glebę można nazwać gruntem, ale nie każdy grunt glebą. Gleboznawstwo zajmuje się tylko utworami zawierającymi w fazie stałej substancję organiczną, natomiast w gruntoznawstwie nie jest to warunek konieczny. Według [28] gleba to: *cienka, zewnętrzna warstwa skorupy ziemskiej, znajdująca się w strefie wietrzenia, podlegająca ciągłym zmianom pod wpływem atmosfery i życia organicznego; jej skład jest uzależniony od skały macierzystej i klimatu*. Należy dodać, że jest to utwór dynamiczny i biologicznie czynny, a głębokość jego występowania to co najmniej zasięg występujących korzeni roślin.

Tabela 1. Podział rodzimych gruntów organicznych według norm budowlanych [106, 109]

Termin	Opis	
	PN-86/B-02480	PN-EN ISO 14688-1
Grunty próchnicze, Humus	grunty nieskaliste, w których zawartość części organicznych jest wynikiem wegetacji roślinnej oraz obecności mikroflory i mikrofauny	pozostałości roślin, żywe organizmy i ich odchody razem ze składnikami nieorganicznymi; tworzy grunt na powierzchni terenu (warstwę przypowierzchniową)
Namuły	grunty powstałe na skutek osadzenia się substancji mineralnych i organicznych w środowisku wodnym; rozróżnia się: – namuły piaszczyste – mające właściwości gruntu niespoistego, – namuły gliniaste – odpowiadające grunto spoistym	brak
Gytie	namuły z zawartością węgla wapnia >5%, który może wiązać szkielet gruntu, nadając mu charakter gruntu skalistego o niskiej zawartości Rc	rozłożone szczątki roślinne i zwierzęce: może zawierać składniki nieorganiczne
Torfy	grunty powstałe z obumarłych i poddanych częściowej karbonizacji części roślin; torfy cechuje na ogół wartość $I_{om} > 30\%$	– torf włóknisty: struktura włóknista, łatwo rozpoznawalne tkanki roślinne, zachowuje pewną wytrzymałość – torf pseudowłóknisty: rozpoznawalne tkanki roślinne: brak wytrzymałości rozpoznawalnego materiału roślinnego – torf amorficzny: brak widocznych struktur roślinnych, konsystencja papkowata
Węgla brunatne i kamiennie	grunty skaliste, powstałe na skutek silnej karbonizacji substancji roślinnych	brak

Tabela 2. Klasyfikacja gruntów zawierających części organiczne [110]

Grunt	Zawartość części organicznych (≤ 2 mm) [% suchej masy]
Niskoorganiczny	od 2 do 6
Organiczny	od 6 do 20
Wysokoorganiczny	≥ 20

Szczególnie interesujące są podziały gleb hydrogenicznych, czyli takich, które powstały w środowisku wodnym zarówno na drodze sedimentacji, jak i sedymentacji. Poniżej przedstawiono ich podział ze względu na zawartość masy organicznej – tabela 3 oraz na miąższość tych utworów w strefie przypowierzchniowej – tabela 4. Zwykle gleby organiczne dzieli się jeszcze ze względu na wzrastającą zawartością substancji organicznej na silnie zamulone, słabo zamulone i niezamulone.

Tabela 3. Klasyfikacja gleb w zależności od zawartości masy organicznej [12]

Gleby	Zawartość części organicznych [% suchej masy]
Mineralne właściwe	do 3
Mineralne próchnicze	od 3 do 10
Mineralno-organiczne	od 10 do 20
Organiczne	>20

Tabela 4. Klasyfikacja gleb w zależności od ich miąższości w strefie przypowierzchniowej [12]

Gleby	Miąższość warstwy organicznej [cm]
Mineralne	>10
Mineralno- organiczne	od 10 do 30
Organiczne	>30

Żadna z norm budowlanych nie podaje jasnego i pełnego podziału gruntów organicznych z uwzględnieniem ich właściwości geologiczno-inżynierskich. Wydaje się, że gdyby połączyć podział genetyczny z normy [106] z tym opartym na zawartości substancji organicznej z normy [108], dodając ułatwiający identyfikację opis zawartej w gruncie substancji organicznej z normy [109], powstałaby spójna klasyfikacja.

Warto również uwzględnić znacznie dokładniejsze od budowlanych klasyfikacji gruntów organicznych, podziały gleb. Metodyka badań fizycznych i fizykochemicznych w gleboznawstwie jest taka sama, jak w gruntoznawstwie i również badany jest ten sam trójfazowy ośrodek [32]. Pozwala to na porównanie wielu parametrów w obu dyscyplinach nauki.

Do badań jako główny składnik kompozytu użyto torfu, ze względu na jego wysoką zawartość substancji organicznej. W dalszej części pracy ograniczono się do opisu tylko tego typu gruntów.

1.4. TORFY

1.4.1. Charakterystyka i geneza

Wyczerpującą definicję torfu podaje norma [105]: *Torf jest to utwór akumulacyjny pochodzenia organicznego, głównie roślinnego, powstały w wyniku procesu torfienia przebiegającego w określonych warunkach wodnych, powietrznych i mikrobiologicznych, składający się ze szczątków roślinnych w różnym stopniu zmumifikowanych oraz humusu torfowego.* Normy budowlane podają zdecydowanie mniej obszerny opis torfu. Skupiają się przede wszystkim na cechach istotnych ze względów inżynierskich oraz umożliwiających jego makroskopowe rozpoznanie. Norma [106] za torfy uznaje: *grunty powstałe z obumarłych i podlegających stopniowej karbonizacji części roślin; torfy cechuje na ogół wartość $I_{om} > 30\%$.* Norma budowlana [109] podaje, że: *torfy mają na ogół małą gęstość i wyraźny zapach.* Ich dalszy opis uzależniony jest od stopnia rozłożenia. Norma ta wyróżnia torf włóknisty, pseudowłóknisty i amorficzny. Precyzyjniej stopień rozłożenia określa skala von Posta [89]. Jest to powszechnie stosowana skala opracowana w latach 20. XX wieku przez szwedzkiego geologa Lennarta von Posta. Pozwala ona w warunkach polowych, makroskopowo określić w torfie zawartość humusu. Obserwuje się sposób przeciskania masy torfu przez palce. Zakres skali obejmuje wartości od 1 (H1) do 10 (H10). Im wyższy stopień skali, tym torf jest bardziej rozłożony.

Ze względów geologicznych torf jest organogenicznym osadem pochodzenia roślinnego (fitogeniczny). Jest utworem czwartorzędowym najmłodszego okresu geologicznego – Holocenu. Określenie: *osad organogeniczny* jest coraz częściej wypierane przez pojęcie *osadu biogenicznego*, chociaż bardzo często niesłusznie stosowane są zamiennie. Osady biogeniczne obejmują nie tylko organiczny materiał pochodzenia roślinnego i zwierzęcego, ale także mineralne związki powstałe w wyniku procesów życiowych biosfery [44]. Torfy, a właściwie torfowiska swój największy rozwój osiągnęły w ciepłym, wilgotnym i umiarkowanym klimacie fazy atlantyckiej. W fazie subborealnej nastąpiło zatrzymanie ich rozwoju spowodowane zmianami klimatycznymi, a następnie w fazie subatlantyckiej ponowne ich tworzenie się [24].

Torfy powstają w wyniku sedentacji biomasy roślinnej w środowisku ziemnowodnym (telmatycznym) lub lądowym (terrestycznym). Sedentacja jest rodzajem akumulacji, polegającym na osadzaniu materiału pochodzenia miejscowego (autochtonicznego). Jest to proces charakterystyczny dla torfowisk, gdzie dzięki zdolności akumulacyjnej systemów korzeniowych roślin torfotwórczych, następuje gromadzenie się fitomasy. Procesy torfotwórcze zachodzą w różnych środowiskach akumulacyjnych, ale zawsze w warunkach występowania wysokiego poziomu wody [44].

W budowie torfowisk można wydzielić dwie warstwy: akrotelmu i katotelmu. Akrotelm tożywiona część torfowiska (złożona z żywych roślin), będąca poziomem torfotwórczym torfowiska – w niej następuje biokumulacja. War-

stwa ta cechuje się między innymi zmienną zawartością wody, obecnością powietrza, wysoką porowatością i przepuszczalnością wody. Jest to warstwa aktywna obfitująca w mikroorganizmy (również tlenowe). Grubość akrotelmu jest niewielka w porównaniu z katotelmem i zróżnicowana morfologicznie. Zwykle sięga do około 0,5 m. Katotelm to nieożywiona część pokładu torfu. Ma stałą pojemność wodną (regulowaną przez akrotelm), niską porowatość i tym samym większą gęstość. Z powodu braku dostępu tlenu występują tam tylko nieliczne mikroorganizmy beztlenowe. Jego grubość ściśle zależy od aktywności procesów torfotwórczych wierzchniej warstwy. Torfowiska mające w swej budowie obie warstwy nazywa się diplotelmicznymi, natomiast nieposiadające akrotelmu – haplotelmicznymi. Zanikanie aktywnej warstwy torfowisk spowodowane jest przez działalność człowieka. Odwadnianie powoduje stopniowe zatrzymanie procesów zachodzących w akrotelmie i tym samym pozbawia torfowisko możliwości narastania [19, 44].

Miąższość torfu zależy między innymi od długości i warunków procesu akumulacji, rodzaju akumulowanego materiału oraz stopnia ich zagęszczenia. Średnia miąższość torfów na podstawie badań prowadzonych w Polsce w ostatnich 60 latach w zależności od publikowanych źródeł wynosi 1,41-1,73 m [19].

1.4.2. Występowanie w Polsce

Torfy występują w silnie uwilgotnionym środowisku, często na bagnach i mokradłach. Powstają w nieckach i zagłębieniach, przy braku odpływu lub stałym bądź okresowym dopływie wody (powierzchniowym lub wgłębnym). Należy pamiętać, że mokradła i bagna w ujęciu hydrograficznym oznaczają tereny nawodnione z płytko znajdującą się wodą gruntową i z występującymi gruntami zarówno organicznymi jak i mineralnymi. Bardzo często pojęcia te są błędnie używane jako synonim torfowisk. Za torfowisko uważa się geobiocenozę powstałą w warunkach uwodnienia z występującą warstwą torfu o miąższości ponad 0,3 m, a w przypadku torfowisk odwodnionych 0,2 m [19].

Rozmieszczenie, liczba i miąższość torfowisk w Polsce jest silnie związana z morfologią terenu, na którą największy wpływ miały zlodowacenia. W obszarach młodoglacjalnych ostatniego zlodowacenia znajduje się 82% torfowisk. Jest to przede wszystkim północna część Polski obejmująca regiony (według podziału fizyczno-geograficznego Polski Jerzego Kondrackiego): Pobrzeży Południowobałtyckich (313), Pojezierzy Południowobałtyckich (314/315), Pobrzeży Wschodniobałtyckich (841) i Pojezierzy Wschodniobałtyckich (842). Leżące bardziej na południe podprovincje Wysoczyzny Podlasko-Białoruskie (843) oraz Polesie (845) są bogate w złoża torfu [19]. Największe kompleksy torfowisk w Polsce występują na obszarach pradolin w dolinie Biebrzy (ok. 100 tys. ha) i Noteci (ok. 50 tys. ha). Zatorfienie kraju zmniejsza się w kierunku południowym [44].

W ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat podejmowano się inwentaryzacji torfowisk Polski. Aktualne dane w tej dziedzinie zostały wydane przez Instytut

Melioracji i Użytków Zielonych w Falentach 1995 roku w formie Komputerowej bazy danych o mokradłach i użytkach zielonych Polski. Według niej mokradła w Polsce zajmują 43458,85 km² (13,89% powierzchni kraju), a torfowiska 12547,58 km². Spośród wszystkich, torfowiska niskie stanowią 92,4%, wysokie 4,3%, a przejściowe 3,3% [19].

1.4.3. Klasyfikacja torfowisk i torfów

W Polsce preferowane jest ujęcie ekologiczne klasyfikacji torfowisk. Zasadność jej stosowania wynika między innymi ze zgodności z genetycznymi podziałami torfu np. Tołpy oraz z genetycznym podziałem surowca torfowego zastosowanym w normie PN-85/G-02500 [44]. Norma ta ma status wycofanej według Polskiego Komitetu Normalizacyjnego, ale nie jest zastąpiona przez żadną inną. Uproszczony podział na jej podstawie przedstawiono w tabeli 5. Wydziela on w poszczególnych typach torfu jednostki podrzędne – rodzaj torfu oraz w obrębie rodzaju gatunek. Zgodnie z tym podziałem wyróżnia się 3 typy, 10 rodzajów i 24 gatunki torfu.

Torfy powstałe na torfowiskach zasilanych przez wody gruntowe i powierzchniowe noszą nazwę niskich, a tworzące się na torfowiskach zasilanych wyłącznie przez wody opadowe – wysokich. Torfowiska niskie powstają zwykle w obniżeniach terenu. Ze względu na sposób zasilania w wodę nie tworzą się ponad poziomem wody gruntowej. Torf tego typu wyróżnia bogactwo gatunkowe tworzących go roślin, najwyższa spośród omawianych typów torfu zawartość składników mineralnych oraz obojętny lub kwaśny odczyn. Torfowiska wysokie tworzą się tylko na terenach o wystarczającej ilości wód opadowych. Dzięki zdolności do jej akumulowania za pomocą wyspecjalizowanych roślin (mchów torfowcowych) możliwe jest narastanie osadu ponad pierwotny poziom terenu. Umożliwia im to, w odróżnieniu od torfowisk niskich, tworzenie wypukłych powierzchni. Torf wysoki charakteryzuje się niską zawartością substancji mineralnych, bardzo dużą pojemnością wodną oraz silnie kwaśnym odczynem. Trzecim typem w omawianej klasyfikacji jest torf przejściowy. Jak sama nazwa wskazuje tworzy się warunkach pośrednich dla wyżej omawianych. Mogą je porastać zarówno rośliny torfowisk niskich, jak i wysokich. W konsekwencji torf przejściowy może wykazywać cechy charakterystyczne dla obu środowisk akumulacji. Uważa się, że są one tylko etapem w rozwoju torfowisk. Podstawą dalszego podziału jest rodzaj i gatunek materii organicznej [44].

Tabela 5. Genetyczny podział torfów [105]

Typ torfu	Rodzaj	Gatunek
Niski – N	wodorostowy	nie normalizuje się
	szuwarowy	trzcinyowy
		oczeretowy
		skrzypowy
		mannowy
	turzycowiskowy	turzycowo-trzcinyowy
		turzycowy
		kłociowy
	mechowiskowy	mszysty
		turzycowo-mszysty
		trawiasto-turzycowy
	olesowy	łozowy
		olchowy
		olchowo-brzozowy
Przejściowy – P	mszarno-przejściowy	torfowcowo-bagnicowy
		torfowcowo-turzycowy
	brzezinowy	brzozowy
Wysoki – W	mszarny-wysoki	torfowcowo-dolinkowy
		torfowcowy, kępowy
		wełniankowo-torfowcowy
		sosnowo-torfowcowy
	wrzosowiskowy	wrzosowaty
		wełnianczkowy
	bór bagnowy	sosnowy

Norma budowlana [109] dzieli torfy w zależności od stopnia jego rozłożenia zgodnie z tabelą 6. Jest to prosty podział umożliwiający inżynierowi w warunkach *in situ* rozpoznanie torfu poprzez wyciskanie z niego wody oraz makroskopowe określenie zawartości włókien.

Tabela 6. Stopień rozłożenia mokrego torfu oznaczany przez wyciskanie [109]

Termin	Stopień rozłożenia	Szczałki roślinne	Wyciskanie
Włóknisty	mało	wyraźnie rozpoznawalne	tylko woda, bez części stałych
Pseudowłóknisty	średnio rozłożony	rozpoznawalne	woda mętna, <50% części stałych
Amorficzny	rozłożony	nierozpoznawalne	pastą, >50% części stałych

Oprócz wyżej wymienionych, istnieje szereg innych klasyfikacji torfu i torfowisk. Kryterium podziału torfu może być: trofia siedliska, skład botaniczny, stopień rozkładu, popielność czy domieszki pochodzenia naturalnego i antropogenicznego. Z kolei kryterium podziału torfowisk może być: sposób zasilania

w wodę, ukształtowanie powierzchni, stratygrafia, miąższość, występowanie poziomu torfotwórczego, sposób użytkowania czy budowa profilu glebowego [19]. Ze względu na inżynierski charakter pracy ograniczono się do omówienia wyłącznie genetycznej klasyfikacji torfu.

1.4.4. Właściwości i budowa torfu

Torf składa się z nierozłożonych części roślin oraz substancji amorficznej – humusu. W zależności, który składnik dominuje torf może różnić się strukturą. Im więcej szczałków roślinnych, tym torf jest bardziej włóknisty. Wraz ze wzrostem zawartości humusu staje się plastyczny i bezpostaciowy. W skład torfu wchodzi również substancje mineralne. Zwykle jest to piasek, rzadziej wytrącenia w postaci związków żelaza lub fosforu [19]. Substancje mineralne mogą częściowo pochodzić z rozkładu roślin torfotwórczych lub z naniesionych przez wodę lub wiatr namulów [12]. Zawartość części mineralnych w torfie nie przekracza 80% [105].

Właściwości torfu zależą od będącej jego głównym składnikiem substancji organicznych. Na duże różnice tych właściwości wpływają również warunki, w jakich tworzył się torf, jego gatunek czy stopień rozkładu. Aktywna część substancji organicznej – humus ma właściwości zbliżone do minerałów ilastych. Oba składniki charakteryzują się wysoką hydrofilnością i wysoką pojemnością sorpcyjną. Substancje te różnią się natomiast w budowie wewnętrznej. Humus jest amorficzny, a minerały ilaste mają budowę krystaliczną [81].

Pod względem chemicznym torf jest niejednorodną, złożoną mieszaniną organicznych kwasów humusowych (fulwowych, huminowych) oraz ich soli, bituminów, celulozy, ligniny i białek [19]. Substancja organiczna ma charakter koloidów hydrofilnych, które po przekroczeniu progu koagulacji w wyniku suszenia, dość łatwo zmieniają swoje właściwości na hydrofobowe [12]. Jednym ze składników substancji organicznej są kwasy humusowe. Zawartość kwasów huminowych rośnie wraz z wiekiem torfu, stopniem rozkładu i głębokością. Odwrotnie jest w przypadku kwasów fulwowych – ich zawartość maleje wraz z wrastającą głębokością występowania torfu. Stosunek kwasów huminowych do fulwowych zwykle mieści się w przedziale od 2 do 8 i rośnie wraz z głębokością [27, 31]. Do najważniejszych cech chemicznych i fizyczno-chemicznych torfu zalicza się między innymi odczyn pH, popielność i skład chemiczny popiołu, powierzchnię wymienną, sorpcję i właściwości jonowymienne.

Oprócz podstawowych cech oznaczanych standardowo dla każdego rodzaju gruntu, takich jak gęstość fazy stałej, gęstość objętościowa, porowatość czy wilgotność, dodatkowo w przypadku torfu określa się stopień jego rozkładu i stopień przeobrażenia murszu. Istotne ze względów inżynierskich są również jego właściwości ekspansywne. Ze względu na włóknistą strukturę torfy mają skłonność do zmian porowatości w zależności od uwilgotnienia. Zjawisko to szczególnie nasila się w okresie zimowym [93]. Największą kurczliwość charakteryzują się torfy turzycowo-mszyste i turzycowo-trzcinowe. Zakres wskaźnika zmian porowatości zawiera się w przedziale od około 12 do $1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ [5].

1.5. OCENA GRUNTÓW ORGANICZNYCH JAKO PODŁOŻA BUDOWLANEGO

Za grunty organiczne uważa się już grunty o zawartości substancji organicznej (w różnym stopniu rozłożonej i zhumifikowanej) wyższej od 2%, co świadczy o jej ogromnym wpływie na właściwości fizyczne, jak i mechaniczne. Substancja ta charakteryzuje się wysoką hydrofilnością, małym stopniem diagenety, niestabilnością składu chemicznego oraz zwykle wysoką wilgotnością i koloidalnością fazy ciekłej. Grunty organiczne zazwyczaj zaliczane są do gruntów słabych, czyli takich o niskich wartościach parametrów wytrzymałościowych [31]. Zwykle charakteryzują się niską wytrzymałością na ścinanie ($\varphi = 0 \div 10^\circ$ i $c = 2 \div 20 \text{ kPa}$), dużą ściśliwością ($M_0 = 0,2 \div 2 \text{ MPa}$) i odkształcalnością prowadzącą do nieprzewidywalnych, długotrwałych i znacznych odkształceń pionowych i poziomych podłoża [14]. W praktyce, w przypadku gruntów o wysokiej zawartości substancji organicznej, do obliczeń można przyjąć $\varphi \approx 0$. Wynika to z faktu, że w przypadku gruntów o wysokim nasyceniu wodą opór przy ścinaniu stawia głównie spójność [42, 49].

Wraz ze wzrostem zawartości substancji organicznych w stosunku do mineralnych, pogarszają się parametry wytrzymałościowe. Dodatkowym niekorzystnym zjawiskiem są zdolności tych gruntów do zmian objętości, niekontrol-

lowane osiadania i reakcja na obciążenie. Występowanie gruntów organicznych o znacznej zawartości substancji organicznej wiąże się również z obecnością płytko zalegających wód gruntowych. Przydatność niemodyfikowanych gruntów organicznych do nasypów i jako podłoże budowlane jest bardzo słaba [14, 49]. Fundamentowanie na nich zawsze wiąże się z trudnościami związanymi z zapewnieniem stateczności budowli i koniecznością stosowania skomplikowanych zabiegów stabilizujących zmieniających pierwotne właściwości gruntu.

Niezwykle ważne jest określenie przestrzennego rozmieszczenia złóż gruntów organicznych. Oczywiście, poza odpowiednio przeprowadzonymi wierceniami, ważna jest obserwacja terenu, a dokładniej poszukiwanie charakterystycznej roślinności porastającej grunty organiczne oraz wywiad z miejscową ludnością. Właściwie przeprowadzona wizja lokalna pozwala uniknąć wielu błędów w interpretacji badań geotechnicznych [23].

Nie wszystkie grunty organiczne są słabonośne. Wyjątkiem są lite skały organiczne, takie jak węgiel brunatny czy kamienny. W wyjątkowych przypadkach również podłoże zbudowane z torfów czy namulów może stanowić dość stabilne podłoże niewielkich obiektów inżynierskich. Jest to możliwe w przypadku gruntów organicznych uprzednio zagęszczonych przez nasuwający się lodowiec lub obciążonych wydmą i występujących głębiej niż poziom posadowienia obiektu [22].

1.6. METODY WZMACNIANIA PODŁOŻY ORGANICZNYCH W GEOTECHNICE

W ostatnich latach następuje rozwój bezpośrednich metod modyfikacji podłoża *in situ*. Jest to nie tylko związane z postępowaniem technologicznym, ale również z coraz większą dbałością o środowisko naturalne i względy ekonomiczne. Celem wszystkich metod wzmocnienia podłoża jest zawsze polepszenie wybranych parametrów geologiczno-inżynierskich budujących je gruntów do oczekiwanych wartości projektowanych. Zwykle efekt wzmocnienia uzyskuje się poprzez mechaniczne zagęszczenie (np. zagęszczenie dynamiczne) lub wprowadzenie w podłoże dodatkowego materiału, mającego działanie stabilizujące (np. cementację). Czasami stosuje się oba sposoby jednocześnie (np. iniekcję zagęszczającą). Dzięki odpowiednio dobranej metodzie i technologii wzmocnienia można między innymi zwiększyć gęstość, wytrzymałość na ściskanie, zmniejszyć ścisłość, kontrolować przepuszczalność, czy zwiększać homogeniczność ulepszanego gruntu. W konsekwencji pozwala to na zapewnienie odpowiedniej nośności podłoża i stateczności projektowanych na nich obiektów inżynierskich [29].

Nie wszystkie ze stosowanych metod wzmocnienia nadają się dla podłoża zbudowanego z wysokoorganicznych gruntów słabonośnych lub mogą być stosowane ze szczególną uwagą. Zjawiska towarzyszące obciążaniu tego typu gruntów przebiegają w sposób bardziej skomplikowany i nieprzewidywalny niż w gruntach mineralnych [38].

Tradycyjnie w przypadku występowania gruntów organicznych o małej miąższości stosuje się całkowitą wymianę gruntu. Metoda ta jest prosta, ale wymaga zawsze ingerencji ciężkiego sprzętu w środowisko naturalne oraz wiąże się z relatywnie wysokimi kosztami i niedostępnością właściwych materiałów mineralnych. W przypadku większych miąższości stosuje się wgłębną wymianę gruntu. Polega ona na wprowadzeniu w grunt, dodatkowego materiału w postaci kolumn z piasku, żwiru, tłucznia, które rozpierając grunt na boki zwiększają jego wytrzymałość. Kolumny te dodatkowo spełniają rolę drenów, przyspieszając konsolidację. Materiał, w zależności od technologii, wprowadzany jest w wzmocniane podłoże za pomocą tylko wibracji (wibrowymiana) lub wspomagany jest dodatkowo silnym wpływem wody lub powietrza przez odpowiednio umiejscowione na wibratorze dysze (wibroflotacja). W przypadku zastosowania tych metod do wzmocniania bardzo słabych i nawodnionych gruntów organicznych należy zwrócić szczególną uwagę, czy wprowadzany materiał nie ulega rozmyciu, mieszając się ze słabym gruntem. Zjawisko to szczególnie może się ujawnić w metodzie wibroflotacji. Dodatkowo w przypadku przewarstwień tego typu gruntów nie powinno się stosować kolumn z samego kruszywa, ponieważ nie występuje dostateczna współpraca pobocznic kolumny

z wzmocnianym gruntem. W tym przypadku konieczne jest wzmocnienie trzonu kolumny zaczynem cementowym lub zastosowanie odpowiedniej mieszanki betonowej albo innego sposobu wymuszenia odpowiedniego nacisku bocznego na pobocznice kolumn [38].

Metody zagęszczania dynamicznego przez wielu specjalistów nie są zalecane dla gruntów organicznych [57]. Wyjątkiem jest szczególna odmiana tej metody-konsolidacja dynamiczna, będąca pochodną i rozwinięciem wymiany dynamicznej stosowanej w latach 70. ubiegłego wieku przez Menarda. Metoda ta polega na udarowym formowaniu we wzmocnianym podłożu wielkośrednicowych kolumn z tłucznia. Do tego celu wykorzystuje się samojezdne urządzenia umożliwiające swobodne opuszczenie obiektów o znacznej masie – ubijaków. Za ich pomocą zostaje wybity otwór, który następnie zasypywany jest odpowiednio dobranym materiałem, takim jak tłuczeń, okruchy skalne, a także odpady przemysłowe i grunty niespoiste. Tak formowana kolumna zostaje ponownie zagęszczona przez ubijak. Następuje rozpieranie materiału na boki i jednoczesna kompakcja zalegającego wokół gruntu. Czynności te powtarzane są, aż do uzyskania oczekiwanego efektu ulepszenia. Głębokość wzmocnienia dochodzi do kilkudziesięciu metrów, a sama metoda może być w zasadzie stosowana dla każdego rodzaju podłoża słabonośnego [56]. Wadą konsolidacji dynamicznej jest występowanie znacznych drgań podłoża po każdym uderzeniu, co w konsekwencji może prowadzić do uszkodzenia wcześniej istniejących obiektów. Ogranicza to jej zastosowanie do obszarów niezabudowanych.

Często stosowaną metodą wzmocniania nieskonsolidowanych gruntów, w tym również organicznych jest prekonsolidacja. Polega ona na wstępnym obciążeniu podłoża odpowiednim balastem (zwykle nasypem), pod wpływem

którego następuje konsolidacja, a w konsekwencji zagęszczenie wzmocnianego gruntu. Poważną wadą metody jest długi czas oczekiwania na zamierzony efekt wzmocnienia, który w przypadku gruntów organicznych może być trudny do oszacowania [38]. W przypadku gruntów nawodnionych proces ten można usprawnić, stosując dreny. Przyspieszają one konsolidację poprzez zmniejszenie drogi filtracji wody na powierzchnię. Zagadnieniami związanymi z prognozowaniem odkształceń przy zastosowaniu pionowych drenów zajmował się Barron. Zaproponowana przez niego w latach 40. ubiegłego wieku teoria konsolidacji trójwymiarowej w znaczący sposób umożliwiła prognozowanie osiadań [18]. Niestety część założeń tej teorii, takich jak jednorodność gruntu, nieodkształcalność ziaren czy jednokierunkowe odkształcenia nie mogą być spełnione w przypadku gruntów organicznych. Grunty te obciążone, ulegają nieprzewidywalnym i nieporównywalnie większym niż w przypadku gruntów mineralnych osiadaniom, a strefa ich uplastycznienia jest trudna do oszacowania [38].

Wzmocnianie podłoża gruntowego przez wprowadzanie pod ciśnieniem materiału stabilizacyjnego jest metodą rozwiniętą przez wiele firm geotechnicznych (np. przez iniekcję strumieniową, iniekcję zagęszczającą, powierzchniową i wgłębne mieszanie gruntów). Grunty organiczne również nadają się do stabilizacji przy użyciu spoiw, ale te o znacznej wilgotności nie powinny być ulepszone przy użyciu ciekłego stabilizatora. Wprowadzony zaczyn po prostu rozplynie się w podłożu praktycznie go nie wzmocniając. Dla gruntów organicznych o wilgotności naturalnej dochodzącej do kilkuset procent zaleca się stosowanie stabilizatora w postaci suchej. Do tego typu metod można zaliczyć metody mieszania gruntu *in situ* – w technologii „na sucho” [45].

Zgodnie z tematyką rozprawy wykorzystano metodę mieszania gruntu *in situ* do wzmocnienia słabonośnego podłoża organicznego. Zalety i charakterystykę metody opisano w dalszej części pracy.

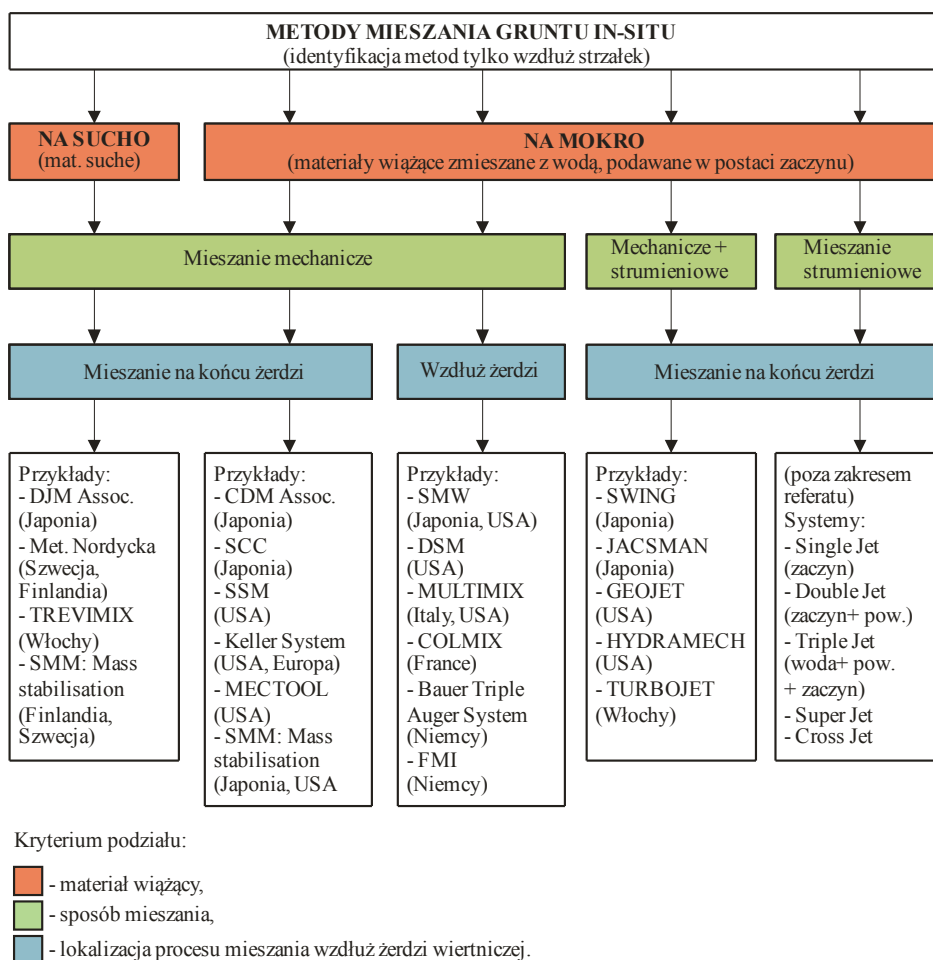
1.7. TECHNOLOGIA MIESZANIA GRUNTÓW *IN SITU*

1.7.1 Zagadnienia ogólne

Metoda mieszania gruntu *in situ* została opracowana i opatentowana w latach 50. XX wieku w Stanach Zjednoczonych. W latach 60. była intensywnie stosowana w Japonii i to tam nastąpił jej największy rozwój. Dzisiejszy stan wiedzy w zakresie metody zawdzięcza się przede wszystkim doświadczeniom ostatnich czterech dekad inżynierów z Japonii i Skandynawii. Współcześnie metoda mieszania gruntów *in situ* stosowana jest praktycznie na całym świecie, a od roku 1995 również i w Polsce [45].

Metoda mieszania gruntu *in situ* w dużym uproszczeniu polega na wymieszaniu wzmocnianego gruntu z odpowiednio dobranym spoiwem. Proces ten może mieć charakter płytki – SMM (z ang. *Shallow Mixing Method*) lub wgłębny – DSM (z ang. *Deep Soil Mixing*), DMM (z ang. *Deep Mixing Method*). Spoiwo może być wprowadzane „na sucho” jako proszek lub „na mokro” w

postaci zaczynu. W wyniku jego wprowadzenia zapoczątkowane zostają procesy wiązania przy udziale wody porowej, gruntowej, a w przypadku gruntów o niewystarczającej wilgotności naturalnej z wodą z zaczynu. Zwykle stosuje się spoiwa mineralne, takie jak cement i wapno, a także inne związki aktywne chemicznie, np. odpady przemysłowe, zwykle stosowane jako składnik dodatkowy. Dzięki ich zastosowaniu wzmacniany grunt ma większą nośność oraz mniejszą odkształcalność i wodoprzepuszczalność niż grunt rodzimy w stanie naturalnym. Istnieje duża różnorodność metod mieszania in situ ze względu na wymagane spoiwo, sposób jego mieszania i podawania oraz lokalizację procesu mieszania wzdłuż żerdzi wiertniczej. Umowny system klasyfikacji ze względu na te parametry przedstawiono na rysunku 2 [45, 114].



Rys. 2. Umowny system klasyfikacji ze względu na materiał wiążący, sposób mieszania i lokalizację procesu mieszania wzdłuż żerdzi wiertniczej [98]

Bardzo często technologie w zależności od wykonawczej firmy geotechnicznej czy kraju zastosowania przyjmują odmienne nazwy, różniąc się szczegółami, co dodatkowo komplikuje ich podział. Metoda mieszania *in situ* ma szerokie możliwości zastosowań w trudnych warunkach gruntowo-wodnych. Może być z powodzeniem stosowana dla wielu rodzajów gruntów mineralnych zarówno spoistych jak i niespoistych, a także gruntów organicznych. W przypadku tych ostatnich należy liczyć z zastosowaniem tylko wybranych stabilizatorów oraz ich znacznie większego zużycia w porównaniu z gruntami mineralnymi. Metody mieszania *in situ* stosuje się między innymi do [38, 45]:

- posadawiania obiektów inżynierskich,
- tworzenia konstrukcji oporowych,
- zabezpieczania gruntu przed upłynięciem,
- stabilizacji i uszczelniania gruntu,
- tworzenia ekranów i przesłon uszczelniających,
- naprawy uszkodzonych wałów przeciwpowodziowych,
- wzmacniania podłoża wielkowymiarowych obiektów (lotnisk, hal przemysłowych, dróg i autostrad, itp.).

Według [99] proces ulepszenia podłoża z zastosowaniem metod mieszania *in situ* składa się z trzech powiązanych ze sobą etapów:

- doboru odpowiedniej metody mieszania („na mokro” lub „na sucho”) oraz technologii (np. metoda nordycka, DJM, TREVIMIX), w zależności od warunków gruntowo-wodnych i oczekiwanych rezultatów,
- ustalenia projektowanej wytrzymałości stabilizowanego gruntu lub/i jego dodatkowych właściwości, zwykle z zastosowaniem prowadzących badań laboratoryjnych, modelowych i polowych,
- wykonania docelowego projektu geotechnicznego, zawierającego między innymi zakres wzmocnienia podłoża, układ i średnice kolumn.

Zastosowanie metod mieszania *in situ*, przy odpowiednim dobraniu rodzaju i zaprojektowaniu udziału spoiwa w masywie gruntowym jest skutecznym, inżynierskim i przyjaznym środowisku bezodpadowym sposobem wzmocnienia słabonośnego podłoża organicznego. Do najważniejszych zalet metody zalicza się [114]:

- brak jakiegokolwiek urobku (odpadów) przed i podczas stabilizacji,
- proces formowania nie generuje drgań, brak negatywnych oddziaływań na otoczenie,
- wykorzystanie w pełni naturalnego składu i właściwości *in situ* gruntów podłoża,
- wykorzystanie szeregu odpadów przemysłowych,
- niższy koszt w stosunku do innych metod modyfikacji.

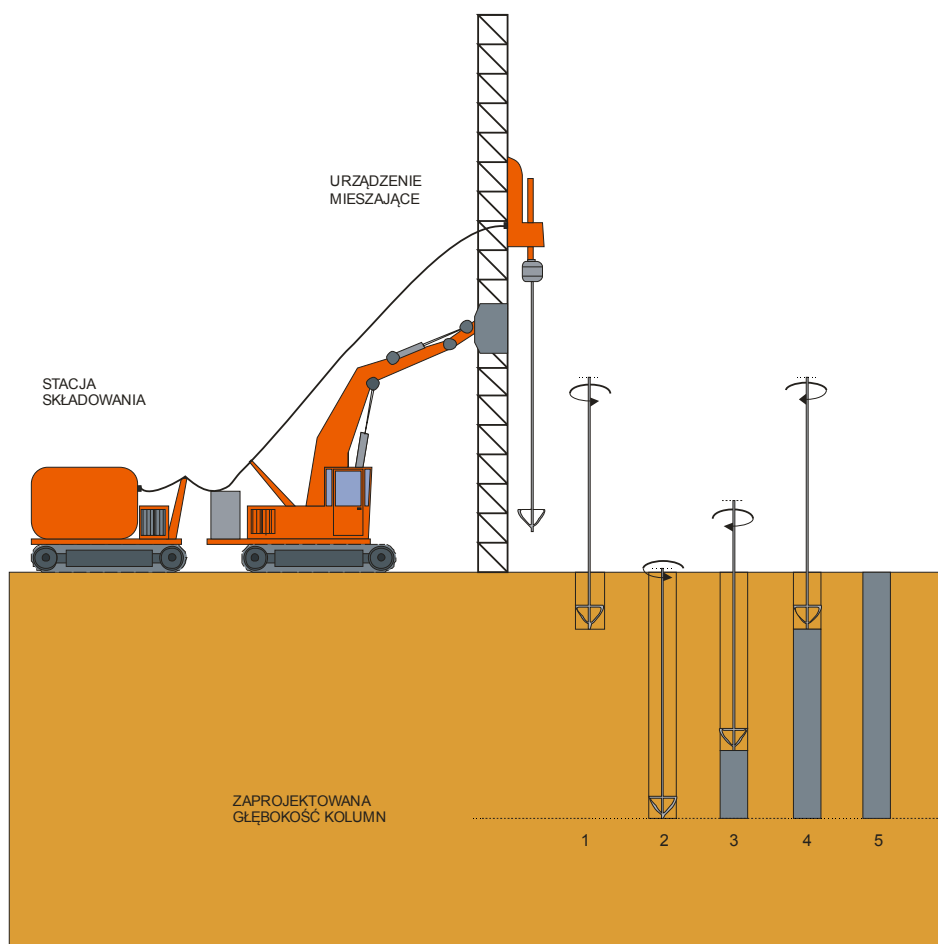
1.7.2. Wybrane metody mieszania gruntów *in situ*

Wysoka wilgotność naturalna gruntów organicznych zwykle uniemożliwia stosowanie metod mieszania „na mokro”, dlatego w dalszej części pracy zwrócono szczególnie uwagę na te, w których spoiwo wprowadzane jest „na sucho”.

Płytkie, powierzchniowe metody mieszania gruntów SMM, często nazywane stabilizacją masową lub objętościową (z ang. *mass stabilisation*) zostały opracowane w celu obniżenia kosztów ulepszenia bardzo słabych gruntów mających stosunkowo niewielką miąższość, a także w celu rekultywacji terenów zanieczyszczonych. Do tego typu stabilizacji można używać urządzeń podobnych do tych stosowanych w metodzie wglębnego mieszania DSM, ale o znaczeniu większej średnicy wiertła (1,8-3,7 m). Formowane są pionowe kolumny, miejsce przy miejscu, tak aby nachodziły na siebie. Dzięki temu, cała objętość wzmacnianego gruntu zostaje dokładnie wymieszana ze stabilizatorem, przy czym głębokość mieszania nie przekracza 12 m. W Finlandii opracowano zupełnie inny sposób stabilizacji powierzchniowej. Założenia metody są takie same, ale używa się do tego celu zupełnie innych urządzeń niż w DSM (DMM). Grunt mieszany jest za pomocą koparek podsiębiernych zaopatrzonych w specjalne tnąco-mieszające końcówki. Dzięki ruchomemu ramieniu, możliwy jest ruch nie tylko pionowy, ale i poziomy mieszadła. Pozwala to nie tylko na dokładniejsze wymieszanie gruntu ze spoiwem, ale także na pracę urządzenia w niewielkiej odległości od miejsca zagłębiania końcówki. Innymi słowy zestaw mieszający nie musi stać bezpośrednio na wzmacnianym gruncie, co pozwala na jego zastosowanie na obszarach wcześniej niedostępnych dla ciężkiego sprzętu. Obszar roboczy wynikający z zasięgu operacyjnego urządzenia obejmuje powierzchnię 8-10 m² i głębokość 1,5-3 m. Maksymalna głębokość robocza metody skandynawskiej nie przekracza 5 m [45, 98].

Najbardziej rozwiniętymi i najczęściej stosowanymi metodami mieszania *in situ* są wglębne metody mieszania DSM (DMM). Według [114] obejmują one metody, które oddziałują na wzmacniane podłoże na głębokość minimum 3 m.

Istnieje szereg modyfikacji technologii wglębnego mieszania gruntu na sucho, ale sam proces formowania kolumn mają podobny (rys. 3). W skład zestawu wchodzi najczęściej maszyna wiertnicza z mieszadłem bądź zestawem mieszadeł charakterystycznych dla danej modyfikacji technologii oraz stacji składowania, mieszania i podawania składników. W metodach tych spoiwo w postaci suchego proszku podawane jest najczęściej przez sprężone powietrze, a jego objętość jest na bieżąco kontrolowana [45].



Rys. 3. Schemat formowania kolumny DSM „na sucho” na przykładzie metody Nordyckiej: 1, 2 – obracające się mieszadło wwierca się na zaprojektowaną głębokość, 3,4 – kierunek obrotu mieszadła zostaje zmieniony, mieszadło jest wyciągane przy jednoczesnym wtłaczaniu sprężonym powietrzem sproszkowanego spoiwa, 5 – uformowana kolumna

Proces tworzenia wzmacniającej kolumny kompozytowej grunt-spoivo, zaczyna się od ustawienia maszyny i wwiercenia się narzędziem niszczącym strukturę wzmocnianego gruntu umocowanym na żerdzi mieszającej na projektowaną głębokość. Następnie dokonywana jest zmiana kierunku obrotu mieszadła i jednoczesne wtłoczenie spoiwa podczas rotacyjnego procesu wyciągania narzędzia [114].

Najbardziej rozpowszechnionymi metodami wgłębnego mieszania *in situ* są metoda nordycka i metoda japońska (DJM). Porównanie tych metod przedstawiono w tabeli 7.

Tabela 7. Porównanie metody nordyckiej i japońskiej wglębnego mieszania *in situ* [114]

Sprzęt	Szczegóły	Metoda Nordycka	Metoda Japońska
Urządzenie mieszające	liczba mieszadeł	1	od 1 do 2
	średnica mieszadła	od 0,4 do 1,0 m	od 0,8 do 1,3 m
	maks. głębokość mieszania	25 m	33 m
	miejsce podawania spoiwa	górną parą mieszadeł	dolną część żerdzi i/lub mieszadła (pojedyncze lub wielokrotne)
	ciśnienie podawania	od 400 do 800 kPa	maks. 300 kPa
Stacja składowania	zdolność podawania	od 50 do 300 kg/min	od 50 do 200 kg/min

W metodzie japońskiej istnieje kilka odmian urządzeń, mających pojedynczą lub podwójną żerdź mieszającą. Standardowo każda z nich zaopatrzona jest w użębione łopatki mieszające zamocowane na dwóch poziomach z przesunięciem kątowym 90°. Cały zestaw ma średnicę od 0,8-1,3 m i pozwala formować kolumny do maksymalnej głębokości 33 m. Spoiwo w postaci proszku (najczęściej cementu) wprowadzane jest przez sprężone powietrze w grunt za pomocą specjalnych otworów iniekcyjnych. Górne otwory, umieszczone powyżej łopatek, przeznaczone są do zasadniczego podawania spoiwa przy wyciąganiu żerdzi. Dolne otwory natomiast służą przede wszystkim do tłoczenia sprężonego powietrza podczas penetracji, a w wyjątkowych przypadkach również spoiwa. Spoiwo podawane jest podczas wyciągania żerdzi, przy zmienionym kierunku obrotu, a w przypadku gruntów bardzo słabych dodatkowo w czasie zagłębiania mieszadła. Odległość żerdzi od siebie jest w pełni regulowana, co pozwala na formowanie kolumn zarówno stycznych, jak i zachodzących na siebie. Ciśnienie sprężonego powietrza jak i ilość podawanego spoiwa jest na bieżąco monitorowana, aby umożliwić dokładne i równomierne uformowanie kolumny [114]. Wysoki moment obrotowy urządzeń stosowanych w metodzie DJM, wynoszący od 20 do 30 kNm, umożliwia mieszanie gruntów spoistych w stanie twaroplastycznym o wytrzymałości na ścinanie nawet 70 kPa i niespoistych o $I_d < 0,64$ ($N < 15$ oznaczonych sondą SPT) [45, 98]. Prędkość zagłębiania się mieszadła w fazie penetracji wynosi od 1,0 do 2,0 m na minutę, a w fazie wyciągania 0,7-0,9 m na minutę. Prędkość obrotowa w zależności od warunków waha się od 24-64 obrotów na minutę [114].

Metoda nordycka powstała i rozwijała się w krajach skandynawskich. Jej największy rozwój nastąpił od końca lat 80. do połowy lat 90. ubiegłego wieku. W 1995 roku zastosowana została po raz pierwszy w Polsce jako w jednym z pierwszych krajów w Europie poza Skandynawią. Wykorzystuje się w niej

znacznie lżejszy sprzęt niż w metodzie japońskiej. Urządzenia mieszające opracowane w Szwecji i Finlandii, dzięki swojej masie i mobilności przystosowane są do pracy w bardzo słabych gruntach, w tym również organicznych [45]. Zaostrzone są tylko w jedną żerdź mieszającą, umożliwiającą formowanie kolumn o średnicy 0,6- 1,0 m do maksymalnej głębokości 25 m, przy możliwym odchyleniu od pionu nawet 70°. W zależności od rodzaju ulepszanego gruntu na końcu żerdzi montuje się odpowiednie wymienne mieszadło, standardowo zbudowane z poziomych i odpowiednio zakrzywionych łopatek mieszających. Spoiwo podawane przez sprężone powietrze wydostaje się przez otwór iniekcyjny umiejscowiony zwykle w pobliżu poziomych łopatek mieszadła. Proces ten odbywa w fazie wyciągania mieszadła i przy przeciwnym niż w czasie penetracji kierunku jego obrotu. W razie potrzeby proces ten może być powtarzany kilkakrotnie w tym samym miejscu. Rodzaj i udział spoiwa zależy od ulepszanego gruntu. Następnie opierając się na tych danych dobiera się parametry, charakteryzujące sam proces mieszania, między innymi: prędkość obrotową mieszadeł czy prędkość z jaką będą one wyciągane z gruntu. Prędkość zagłębiania się mieszadła w fazie penetracji wynosi od 2,0 do 6,0 m na minutę, a w fazie wyciągania 1,5-6,0 m na minutę. Prędkość obrotowa, w zależności od warunków, wynosi 100-200 obrotów na minutę [114].

1.7.3 Stosowane spoiwa i dodatki

Metoda mieszania gruntu *in situ* z założenia wymaga wprowadzenia w ulepszone podłoże gruntowe dodatkowego składnika mającego działanie wzmacniające. Jest nim odpowiednio dobrane, aktywne chemicznie spoiwo i w razie potrzeby dodatkowy składnik, którym według [114] może być:

- **domieszka** – wpływająca na proces wzmacniania podłoża, mająca na przykład działanie upłynniające, rozpraszające czy opóźniające procesy wiązania spoiwa,
- **woda** – dodawana w przypadku gruntów o zbyt małej wilgotności naturalnej uniemożliwiającej zapoczątkowanie procesów wiązania zaczynu, poprawiająca również urabialność mieszanki,
- **wypelniacz** – składnik nieaktywny, mający przede wszystkim na celu uszczelnienie i zmniejszenie porowatości wzmacnianego podłoża, na przykład piasek czy proszek wapienny,
- **zbrojenie** – składnik w postaci prętów, siatek, kształtowników wprowadzany we wzmacniane podłoże w celu zwiększenia jego wytrzymałości i zmniejszenia odkształcalności, zbrojeniem mogą być zarówno elementy stalowe takie jak pręty zbrojeniowe, kształtowniki HEB, IPE, ceowniki, rury jak i materiały z tworzyw sztucznych – geotekstyli.

W zależności od rodzaju gruntu, jego naturalnych właściwości genetycznych i wymaganych efektów wzmocnienia projektuje się skład receptur dostosowanych do oczekiwanych wartości parametrów. W tabeli 8 przedstawiono zalecane spoiwa stosowane w metodzie mieszania gruntu *in situ* „na sucho” [114].

Tabela 8. Zalecane spoiwa w metodzie mieszania gruntu *in situ* „na sucho” [114]

Rodzaj gruntu	Odpowiednie spoiwo
Glina	wapno lub wapno/cement
Quick clay ¹	wapno lub wapno/cement
Namuł i Gytia	wapno/cement lub cement/granulowany żużel wielkopiecowy lub wapno/gips
Torf	cement lub cement/granulowany żużel wielkopiecowy lub wapno/gips/cement
Grunty siarczanowe	cement lub cement/granulowany żużel wielkopiecowy
Pył	wapno/cement lub cement

Najczęściej stosowanymi spoiwami mineralnymi są cement oraz wapno, rzadziej gips. Ich zadaniem jest stworzenie przestrzennego, nośnego szkieletu kompozytu grunt-spoivo, powstającego na matrycy fazy stałej gruntu w wyniku procesów wiązania i twardnienia spoiwa po zarobieniu w wodzie. Procesy te spowodowane są szeregiem reakcji chemicznych, takich jak: uwodnienie (wszystkie spoiwa), hydroliza (spoiwa hydrauliczne) czy karbonatyzacja (spoiwa wapienne) [9]. Oprócz typowych spoiw mineralnych, zwykle jako składnik drugorzędny, stosuje się inne substancje, których użycie ma na celu modyfikację określonych parametrów kompozytu, obniżenie kosztów czy utylizację odpadów przemysłowych. Należą do nich między innymi: reaktywne popioły lotne i żużle wielkopiecowe oraz wypełniacze w postaci kruszyw. Odpowiednio zastosowane dodatki hydrauliczne i pucolanowe mogą częściowo zastąpić stosowane spoiwo mineralne [20]. Poniżej przedstawiono charakterystykę wybranych spoiw i innych substancji stosowanych do ulepszania gruntów metodami mieszania *in situ*, ze szczególnym naciskiem na cement. Spoiwo to stosowane jest do wzmacniania gruntów organicznych i jest bezpośrednio związane z tematyką prowadzonych przez autora badań. Dokładny opis procesów towarzyszących wiązaniu poszczególnych spoiw pominięto, ponieważ są powszechnie znane i wyczerpująco opisane przez wielu autorów, między innymi [9, 13, 20, 25, 34].

Cement jest najczęściej stosowanym spoiwem hydraulicznym. Na jego powszechność obok korzystnych parametrów wytrzymałościowych wpływa ogólnodostępność surowców do jego wytwarzania, takich jak wapień, glina czy margiel. Oprócz nich, w skład tak zwanej mączki surowej wchodzi również SiO₂ w postaci piasku kwarcowego, ruda żelaza Fe₂O₃ i/lub żużle hutnicze.

¹ Specyficzny osad morskiego pochodzenia, o wysokiej wilgotności naturalnej dochodzącej do 80%, bardzo wrażliwy na zmiany obciążenia, w wyniku których łatwo zmienia stan skupienia na płynny. Osad ten nie występuje w Polsce i nie ma swojego odpowiednika w nazewnictwie.

W wyniku procesu produkcyjnego, między innymi rozdrabniania, mielenia, odważania i wypalania powstaje najważniejszy produkt – klinkier cementowy [9]. Główne składniki chemiczne cementu przedstawiono w tabeli 9. Dodatkowo dodaje się do niego zmielony gips i/lub anhydryt, który ma za zadanie spowolnienie procesu wiązania w fazie początkowej.

Tabela 9. Skład chemiczny cementu portlandzkiego [9, 20]

Wzór chemiczny	Nazwa chemiczna	Oznaczenie skrócone	Zawartość [% masy]
CaO	Tlenek wapnia	C	60-70%
SiO ₂	Krzemionka	S	18-25%
Al ₂ O ₃	Tlenek glinu	A	4-9%
Fe ₂ O ₃	Tlenek żelaza	F	1-5%
MgO	Tlenek magnezu	M	1-5%
SO ₃	Trójtlenek siarki	S	1-3%
Na ₂ O+K ₂ O	Tlenek sodu i potasu (alkalia)	N+K	0,5-1,8%

Głównymi minerałami cementu jest alit, belit, braunmilleryt i glinian trójwapniowy. Skład mineralogiczny cementu przedstawiono w tabeli 10.

Tabela 10. Główne minerały cementu [20]

Nazwa minerału	Wzór chemiczny	Nazwa chemiczna	Oznaczenie skrócone	Zawartość [% masy]
Alit	3CaO·SiO ₂	Krzemian trójwapniowy	C ₃ S	55-65
Belit	2CaO·SiO ₂	Krzemian dwuwapniowy	C ₂ S	15-25
Celit	3CaO·Al ₂ O ₃	Glinian trójwapniowy	C ₃ A	8-12
Braunmilleryt	4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃	Żelazoglinian czterowapniowy	C ₄ AF	8-12

Ziarna cementu są zwykle krępe o powierzchni chropowatej z licznymi załamaniem i możliwymi pęknięciami. Ich średnica zawiera się w przedziale 5-80 μm, przy czym dopuszcza się występowanie w ilości od 5 do 15%. większych ziaren (nadziarna), ale nieprzekraczających 200 μm. Dominującą frakcją są ziarna w rozmiarze od 20 do 40 μm. Mniejsze ziarna szybciej uczestniczą w kształtowaniu wytrzymałości zaczynu. Ze względu na zaadsorbowane na powierzchni ziaren pęcherzyki powietrza cement ma niewielką gęstość nasy-

pową (1,1-1,3 kg/dm³) w odróżnieniu od gęstości właściwej (ok. 3,1 kg/dm³) [20].

Cement w środowisku wodnym ulega hydratacji. W terminologii chemii budowlanej jest to szereg reakcji chemicznych powstałych w wyniku dodania wody do cementu. Zatem nie jest to tylko reakcja przyłączenia wody (uwodnienia), ale również hydroliza oraz procesy kongruentnego i inkongruentnego rozkładu składników cementu i niektórych i wybranych produktów reakcji w fazie ciekłej. W procesach w uproszczeniu nazwanych hydratacją cementu rozważa się nie tylko właściwości hydrauliczne, ale także pucolanowe zachodzące dodatkowo między mineralnymi składnikami cementu w obecności wody i wodorotlenku wapniowego [9]. Podczas hydratacji następuje twardnienie przetworzonych lub nowo utworzonych związków. Przyjmuje się, że hydratacja trwa od momentu zmieszania cementu z wodą do uzyskania oczekiwanej wytrzymałości [20].

Istnieje wiele teorii wiązania zaczynu cementowego. Jedną z nich krystaliczno-koloidalną przyjmuje, że stwardniały zaczyn jest niejednorodną mieszaniną żelowych i krystalicznych produktów hydratacji. Wiele z tworzących się w czasie tych skomplikowanych procesów związków nadal nie jest do końca poznanych. Dzisiejszy stan wiedzy pozwala określić podstawowe reakcje i wyróżnić najważniejsze produkty zachodzących reakcji [20]. Objętościowy skład zhydratyzowanych faz cementu jest następujący [9]:

- 55% to faza amorficzna – żel CSH, z czego 25% stanowią pory żelazowe,
- 20% to kryształy CH (<1 mm),
- 10% to kryształy etryngitu (<10 μm) i monosulfitu (<1 μm),
- 15% to pory kapilarne po odparowaniu wody.

Oprócz cementu, jako spoiwa bardzo często używa się wapna, otrzymywanego w wyniku prażenia wapieni, wapieni dolomitowych czy wapieni gliniastych. W budownictwie, w zależności od materiału wyjściowego i uzyskanych właściwości, wyróżnia się wapno powietrzne lub hydrauliczne. Do ulepszenia gruntów stosuje się przede wszystkim wapno powietrzne (twardniejące w powietrzu) składające się głównie z tlenku lub wodorotlenku wapnia. Wapno palone po dodaniu wody ulega gwałtownej reakcji z jednoczesnym wydzielaniem się ciepła. W czasie egzotermicznej reakcji gaszenia temperatura układu wzrasta nawet do ponad 100°C. Część wody ulega odparowaniu, a objętość fazy stałej zwiększa się niemal dwukrotnie. Te właściwości wapna palonego wykorzystywane są w geotechnice do osuszania gruntów [9, 34]. Wapno palone CaO w wyniku działania wody przechodzi w gaszone w postaci wodorotlenku wapnia Ca(OH)₂. Proces wiązania następuje w wyniku wysychania i krystalizacji Ca(OH)₂ z roztworu oraz karboantyzacji polegającej na łączeniu się Ca(OH)₂ z CO₂ z powietrza atmosferycznego [9]. Twardnienie w przypadku wapna jest procesem długotrwałym. Biorą w nim udział również krzemiany i gliniany (zanieczyszczenia z procesu wypalania wapieni) oraz krzemionka (na przykład z piasku). Reagując z wapnem i wodą, tworzą pewne ilości związków hydraulicznych. Wynikiem tego jest tworzenie się faz między innymi CSH, takich jak

w przypadku cementu, co zwiększa wytrzymałość wzmocnianego gruntu. Na przebieg reakcji korzystnie wpływa silnie zasadowy odczyn spowodowany obecnością wapna ($\text{pH} > 12$) [34, 65]. Należy pamiętać, że przy wzmocnianiu gruntów organicznych samym wapnem reakcje puculoanowe będą zachodzić bardzo wolno. Proces można przyspieszyć poprzez dodanie cementu [82]. Do stabilizacji wapnem nadają się przede wszystkim grunty o wysokiej zawartości minerałów ilastych, gdyż tylko w ich obecności mogą zajść reakcje jonowymienne niezbędne do utworzenia CSH.

Gips jest również spoiwem powietrznym. Surowcem do jego wytwarzania jest naturalny kamień gipsowy, a także chemiczne odpady przemysłowe zawierające dwuwodny siarczan wapniowy $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. W wyniku prażenia rozdrobnionego kamienia gipsowego powstaje spoiwo złożone głównie z gipsu półwodnego $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$. Gips odznacza się krótkim czasem wiązania, a jego wytrzymałość w odróżnieniu od spoiw cementowych i wapiennych tylko w małym stopniu zależy od czasu. Największy wpływ na wiązanie i końcową wytrzymałość ma ilość wody oraz stopień wysuszenia. Im mniejsza wilgotność tworzywa gipsowego, tym wyższa jego wytrzymałość. Z właściwości spoiwa gipsowego wynikają jego największe wady, czyli jego duża nasiąkliwość oraz znaczny spadek wytrzymałości (nawet o 70%) po zawilgoceniu [34]. Gips znajduje zastosowanie w stabilizacji gruntów organicznych. Dodanie półnawodnionego lub całkowicie nawodnionego gipsu do wzmocnianego wapnem gruntu w początkowej fazie (7-10 dni) wyraźnie przyspiesza procesy wiązania [64].

Popioły lotne otrzymywane są w ogromnych ilościach jako odpad w zakładach energetycznych. Powstają podczas spalania węgla brunatnego i kamiennego. W Polsce większość energii elektrycznej i ciepłej uzyskiwana jest właśnie w ten sposób, stąd ilość tego materiału odpadowego jest znaczna (około 20 mln ton rocznie). W zależności od składu mineralogicznego wyróżnia się popioły krzemionkowe i wapienne. Najczęściej jako dodatek do cementu używa się popiołów krzemionkowych. Właściwości hydrauliczne i puculanowe popiołów zależą od materiału wyjściowego, z którego powstały. Wraz ze wzrostem zawartości fazy szklistej w ich składzie i stopnia rozdrobnienia, polepszeniu ulegają właściwości puculanowe [9]. Krzemionka SiO_2 łączy się ze słabym wodorotlenkiem wapniowym $\text{Ca}(\text{OH})_2$ w hydratyzującym cemencie, zwiększając ilość żelu CSH, co decyduje o końcowej wytrzymałości mieszanki [20].

Żużle metalurgiczne są odpadem hutniczej przeróbki rud. Powstają w końcowej fazie procesu hutniczego w postaci stopu z zanieczyszczeń rudy i dodatków (topników). Różnią się właściwościami i składem chemicznym w zależności od rodzaju procesu metalurgicznego czy szybkości chłodzenia. Do ulepszenia gruntów najczęściej stosuje się granulowany żużel wielkopiecowy, który zwykle w swoim składzie zawiera 33% SiO_2 , 12% Al_2O_3 , 38% CaO , 13% MgO i 1% Fe_2O_3 [9]. Im wyższa zawartość szkliva w ich składzie (dochodząca nawet do 90% masy) i wyższa powierzchnia właściwa ($>3500 \text{ cm}^2/\text{g}$), tym lepsze jego właściwości hydrauliczne. Ze względu na większą niż w przypadku dodatków

pucolanowych zawartość wapna, mają analogiczny do cementu, choć wolniejszy charakter wiązania [20].

Kruszywa mineralne, takie jak piaski kwarcowe czy żwiry są uzupełnieniem fazy stałej i dodatkiem zwiększającym objętość mieszanki. Ich udział, zwłaszcza w przypadku gruntów o wysokiej zawartości substancji organicznej, powoduje zwiększenie gęstości objętościowej poprzez wypełnienie pustych przestrzeni i jednocześnie zwiększenie gęstości objętościowej szkieletu mineralnego. Kruszywo tworzy wraz z zastosowanym spoiwem nowy, nośny szkielet wzmocnianego gruntu. Dodatkowo zmniejsza skurcz podczas dojrzwania mieszanki i umożliwia obniżenie kosztów poprzez zmniejszenie ilości dodawanego spoiwa [20]. Stosowany np. ze spoiwem wapiennym zwiększa wchłanianie dwutlenku węgla CO₂, przyspieszając karbonatyzację węgla mieszanki [34].

1.7.4. Standardowe badania sprawdzające

Istotnym elementem w metodach mieszania *in situ* są laboratoryjne i polowe badania sprawdzające. Programowanie badań i zakres ich stosowania powinny wynikać z oczekiwanego efektu ulepszenia. Przykładowo, jeżeli celem jest zmniejszenie osiadań, to decydującym parametrem jest moduł odkształcenia, a w przypadku poprawy stateczności za parametr wiodący przyjmuje się wytrzymałość kompozytu.

Badania laboratoryjne mają przede wszystkim na celu wybranie odpowiednich składników mieszanki wzmocniającej, ich udziału oraz oceny skuteczności ich zastosowania. Do tego typu badań wykorzystuje się próbki formowane

w warunkach laboratoryjnych oraz pobierane w warunkach polowych (próbki rdzeniowe Φ 50-100 mm, próbki blokowe 150 x 150 mm lub materiał płynny pobrany *in situ*, formowany w warunkach laboratoryjnych). W zależności od potrzeb określone są odpowiednie parametry geologiczno-inżynierskie. Wyniki badań, zwłaszcza tych prowadzonych na próbkach formowanych w warunkach laboratoryjnych, mogą znacznie odbiegać od rzeczywistych. Wynika to zwykle z lepszych warunków podczas formowania i dojrzwania. Stosuje się w tym celu odpowiednie poprawki pozwalające przybliżyć wyniki badań laboratoryjnych z tymi otrzymywanymi *in situ*.

Oprócz badań laboratoryjnych, wykonuje się również badania polowe, prowadzone bezpośrednio we wzmocnianym podłożu zwykle na specjalnie wyznaczonym do tego celu testowym [114]. Do najczęściej wykonywanych badań polowych należą metody penetracyjne, próbne obciążenia, metody geofizyczne, odkrywki oraz metody nieniszczące.

Badania penetracyjne służą przede wszystkim określeniu parametrów wytrzymałościowych, a w przypadku kolumn także ocenie ich ciągłości. Do najczęściej stosowanych należą badania: sondą statyczną CPT (z ang. *Cone Penetration Test*), sondą z końcówką cylindryczną SPT (z ang. *Standard Penetration Test*), sondą obrotową RPT (z ang. *Rotary Penetration Test*), presjometryczne

PMT (z ang. *Pressuremeter Test*), sondą przeznaczoną specjalnie do badania kolumn zaopatrzoną w specjalne przeciwległe łopatki: wprowadzaną konwencjonalnie – CCP (z ang. *Conventional Column Penetrometer*) lub od spodu kolumny – RCP (z ang. *Reverse Column Penetrometer*), sondą CVP (z ang. *Column Vane Penetrometer*), sondą statyczno-dynamiczną SDP (z ang. *Static-Dynamic Penetration*) czy sondą dynamiczną DCP (z ang. *Dynamic Cone Penetration*).

Próbne obciążenia wykonuje się za pomocą zwykłej płyty – PLT (z ang. *Plate Loading Test*) lub jej modyfikacji zaopatrzonej w pojedynczy ślimak (z ang. *Screw Plate Test*). W przypadku metody wgłębnego mieszania obciążane są pojedyncze kolumny lub całe ich grupy [45, 69].

Badania geofizyczne (np. sejsmiczne, oporowe, radarowe) mogą być wykorzystywane do badania integralności kolumn, a także do pośredniego oznaczania modułu odkształcenia i wytrzymałości. Jednak interpretacja wyników badania geofizycznych, jest wciąż w fazie ustaleń [114].

Godne uwagi są również badania nieniszczące, wykorzystujące ultradźwięki i zjawiska rozchodzenia się fal wzdłuż trzonu kolumny. Pozwalają one ocenić jej ciągłość bez niszczenia kolumn. Metoda ta wykrywa wszystkie niekorzystne zmiany w strukturze badanego medium, takie jak, pęknięcia, ubytki, zmiany przekroju czy konsystencji. Interpretacja wyników odbywa się zwykle w miejscu badania, co jest dodatkowym atutem metody [83].

Odkrywki, stosowane zazwyczaj w przypadku wgłębnego mieszania *in situ*, pozwalają na wizualną ocenę wzmocnienia (np. kształt kolumn, ciągłość, umiejscowienie w planie), a także umożliwiają pobranie próbek czy przeprowadzenie sondowań. Zdarza się, że pojedyncze kolumny zostają całkowicie odsłonięte. Tego typu działania łączą się zwykle z wysokimi kosztami, pracochłonnością oraz ograniczeniami logistycznymi [45].

1.7.5. Laboratoryjne badania wytrzymałości kompozytu na jednoosiowe ściskanie

Laboratoryjne badania sprawdzające mają na celu określenie reakcji wzmocnianego gruntu na dodawany stabilizator (spoiwo). Pozwalają dobrać rodzaj, ilość i proporcje poszczególnych spoiw oraz stwierdzić czy stosunek w/c jest odpowiedni do oczekiwanego efektu wzmocnienia podłoża gruntowego. Mimo że wytrzymałości na ściskanie uzyskiwane w warunkach laboratoryjnych odbiegają od polowych, badania laboratoryjne są nieodłącznym i ważnym elementem w projektowaniu receptury wzmocnienia danego podłoża [114].

Obowiązująca norma [114] powołuje się na sposób przygotowania próbek w warunkach laboratoryjnych zgodny z [104]. Projekt EuroSoilStab podaje sposoby przygotowania i dojrzewania próbek, odtwarzające warunki zarówno stabilizacji płytkiej (powierzchniowej), jak i wgłębnej. Mimo iż jest to jedna z nielicznych publikacji unifikujących sposób przeprowadzania laboratoryjnych badań sprawdzających dla podłoży wzmocnianych metodami mieszania, zda-

niem autora nie rozwiązuje wszystkich wątpliwości związanych z tym zagadnieniem. W dalszym ciągu brak jest polskiego, standardowego podejścia do tego typu badań. Zwykle stosowane są autorskie metody badań będące wypadkową norm geotechnicznych, projektu EuroSoilStab [104], wytycznych dotyczących badania wytrzymałości betonu oraz własnych doświadczeń z wcześniej przeprowadzonych badań. Krajami przodującymi w laboratoryjnych badaniach wytrzymałości kompozytów gruntowych są państwa skandynawskie bazujące na własnych wieloletnich doświadczeniach.

Do badania wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie stosuje się zwykle formy cylindryczne o średnicy 50-100 mm oraz formy sześciennie o wymiarach 150x150x150 mm [45]. Kształt i wymiary próbek mają istotny wpływ na wytrzymałość kompozytu. Z przeprowadzonych badań wynika, że im większa średnica próbki, tym rozrzut wyników wytrzymałości na ściskanie jest mniejszy [90]. Zaobserwowano również, że dla mniejszych średnic uzyskuje się niższe wytrzymałości, co może wynikać z większego wpływu niejednorodności gruntu organicznego. Próbki sześciennie dają porównywalne wyniki z próbkami cylindrycznymi o większych średnicach [79].

Istnieje wiele czynników w procesie formowania próbek, na które należy zwrócić uwagę. Na końcową wytrzymałość kompozytu ma między innymi wpływ [90]:

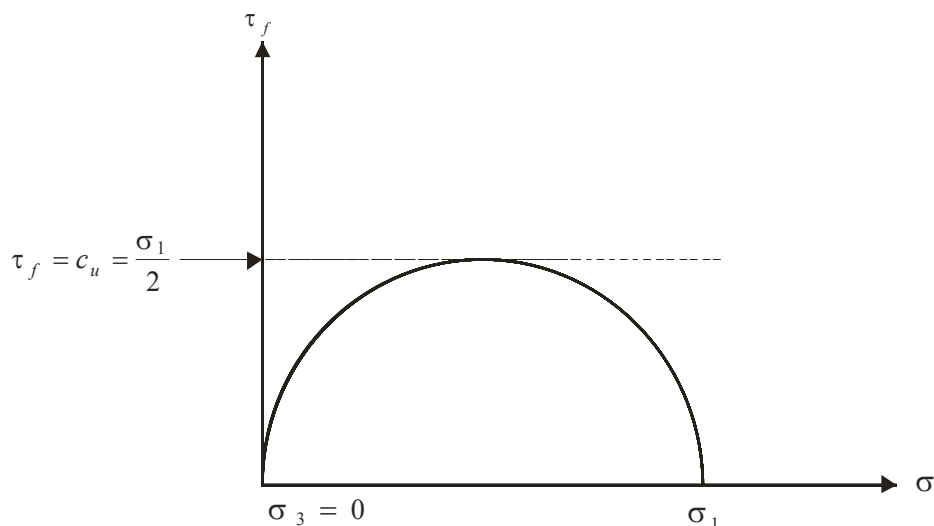
- sposób składowania pobranego gruntu do stabilizacji,
- metoda i czas mieszania kompozytu,
- wielkość i kształt próbek,
- sposób umieszczania kompozytu w formie,
- czas i warunki dojrzewania próbek,
- wartość przyłożonego obciążenie podczas dojrzewania,
- sposób rozformowania.

Specjalny sposób laboratoryjnych badań stabilizowanych gruntów organicznych wynika z zawartości substancji organicznej. Wymusza specyficzny sposób formowania oraz specjalne warunki dojrzewania. Najczęściej stosowaną metodę zaproponowali i rozwinęli Finowie [53]. Opracowano ją dla torfu, ale z powodzeniem może być również stosowana dla innych gruntów o wysokiej zawartości substancji organicznej. Cechami charakterystycznymi fińskiej metody jest obciążenie próbek po wymieszaniu gruntu ze stabilizatorem oraz dojrzewanie w warunkach swobodnego dopływu wody. Ten sposób odtwarza rzeczywiste warunki wzmocnienia w warunkach laboratoryjnych. Próbki obciąża się w celu konsolidacji próbek kompozytu. Wynika to z faktu, że w trakcie powierzchniowej stabilizacji po wprowadzeniu spoiwa i wymieszaniu z gruntem, wzmocnione podłoże obciąża się zwykle warstwą piasku ułożoną na geotekstyliach. Przy głębokim mieszaniu kompozyt gruntowy w zależności od wybranej technologii ulega również zagęszczeniu. Próbki dojrzewają zanurzone (częściowo) w wodzie, ponieważ w rzeczywistości wzmocnione podłoże ma naturalną możliwość pochłaniania wody z zalegających wokół nienaruszonych gruntów organicznych o wysokiej wilgotności.

Jako parametr wiodący przy projektowaniu składu mieszanki można przyjmować stosunek wody do cementu – w/c, tak samo jak przy projektowaniu betonu. Udział cementu w mieszance przeliczany jest jednocześnie na współczynnik α (z ang. *cement factor*) określający ilość zastosowanego cementu w kilogramach na metr sześcienny. Ilość cementu zależy w przypadku gruntów organicznych przede wszystkim od procentowej zawartości substancji organicznej, od jej składu oraz wilgotności naturalnej gruntu.

Udział cementu w mieszance powinien wynikać z poprzedzających wzmocnienie badań gruntu określających jego podstawowe cechy, a także od przeznaczenia konstrukcji. Jak pokazuje praktyka osiągnięcie wysokich wytrzymałości kompozytu możliwe jest przy odpowiednio wysokiej zawartości cementu. W przypadku kolumn zaleca się jednak jej ograniczenie do około 150-250 kPa, aby nie były one zbyt sztywne w stosunku do otaczającego je słabego gruntu. W odróżnieniu od pali betonowych kolumny te z zasady nie przenoszą obciążeń bezpośrednio wyłącznie na głębiej położone warstwy nośne. Ich rola polega przede wszystkim na zeskaleniu gruntu zalegającego w ich obrębie tworząc odpowiednio zeskalony blok gruntu [70, 82].

Miarą wytrzymałości gruntu jest opór, jaki stawia on siłom ścinającym. Najczęściej stosowaną metodą oznaczenia wytrzymałości na ścinanie, bez odpływu wody dla próbek kompozytu, jest specyficzna odmiana badania w aparacie trójosiowego ściskania – UCS (z ang. *Unconfined Compression Strength Test*). Polega ona na tym, że podczas badania utrzymuje się w komorze ciśnienie równe ciśnieniu atmosferycznemu, czyli $\sigma_3 = 0$. Otrzymujemy zatem tylko jeden wynik do wykreślenia kół Mohra (rys. 4), a wytrzymałość gruntu na ścinanie bez odpływu wody jest liczona jako połowa wytrzymałości na ściskanie, przy założeniu, że kąt tarcia wewnętrzznego jest równy zero. Oczywiście sposób ten słuszny jest tylko w przypadku pełnego nasycenia wodą. W rzeczywistości nigdy nie ma pewności czy grunt pracuje w takich warunkach. Zwykle nie jest w pełni nasycony wodą, a kąt tarcia wewnętrzznego nie jest równy zero. Bezpieczniej jest zatem operować wartością wytrzymałości gruntu na jednoosiowe ściskanie niż jego wytrzymałością na ścinanie [54, 115]. Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie można również oznaczać w maszynach wytrzymałościowych – prasach hydraulicznych, które dodatkowo dają możliwość rejestrowania odkształcenia.



Rys. 4. Interpretacja graficzna wytrzymałości gruntu na ścinanie oznaczonej w aparacie trójosiowego ściskania dla $\sigma_3 = 0$ [42]

Przy projektowaniu mieszanki należy pamiętać, że wytrzymałość charakterystyczna kompozytu na jednoosiowe ściskanie f_{ck} powinna być przyjmowana na poziomie około 50% średniej wytrzymałości polowej. W przypadku określania f_{ck} na podstawie badań laboratoryjnych należy przyjmować jej wartość równą około 30-40% średniej wytrzymałości uzyskanej w tych warunkach. Tak duże rozbieżności wynikają z lepszych warunków mieszania i dojrzewania niż ma to miejsce w rzeczywistości [100].

1.8. WPLYW SUBSTANCJI ORGANICZNEJ NA WYTRZYMAŁOŚĆ KOMPOZYTU

Cementogrunt (grunt stabilizowany cementem) to specyficzna odmiana betonu, gdzie zamiast kruszywa występuje faza stała gruntu. W gruntach organicznych, których zwykle wilgotność naturalna jest wysoka i wynosi więcej niż 60% stosuje się metody mieszania gruntu ze spoiwem „na sucho” [45]. Po wprowadzeniu cementu pod ciśnieniem i wymieszaniu go z wzmocnianym podłożem, cement wchodzi w reakcje z wodą zawartą w porach gruntu organicznego. Mieszanina zaczyna zestalać się w wyniku twardnienia zaczynu cementowego. Dodatkowo zachodzi zjawisko adhezji pomiędzy zaczynem cementowym a fazą stałą szkieletu gruntowego. Efektem wymienionych procesów jest powstanie trójwymiarowego szkieletu nośnego kompozytu [20].

W skład fazy stałej gruntu wchodzi faza mineralna (węglanowa i bezwęglanowa) oraz substancja organiczna. Wraz ze wzrostem zawartości substancji organicznej obniża się skuteczność stabilizacji cementem. Substancja ta okrywa

fazę mineralną, opóźniając bądź całkowicie uniemożliwiając proces hydratacji. Niektóre składniki wchodzące w skład substancji organicznej szczególnie niekorzystnie wpływają na proces wiązania zaczynu cementowego. Takimi składnikami są organiczne związki kwasowe, takie jak na przykład kwas octowy (produkt utleniania glukozy), kwas taninowy, czy kwas humusowy (składnik próchnicy). Kwasy te nie pozwalają uzyskać wystarczająco wysokiego poziomu pH niezbędnego do wytworzenia najważniejszych składników wiążących zaczynu cementowego. Prowadzi to do koncentracji związków siarczanowych SO_4 . Oznacza to, że proces wiązania nie został zapoczątkowany, gdyż nie wytworzył się etryngit. W konsekwencji kompozyty takie charakteryzują się bardzo niską wytrzymałością [101]. Ponadto kwas humusowy z wapnem z zaczynu cementowego tworzy rodzaj mydła, które uniemożliwia prawidłowe wiązanie [34]. Kwasy organiczne w większości zawierające grupy karboksylowe obok cukrów już w małej ilości opóźniają proces wiązania. Jedną z hipotez przyjmuje, że na proces ten wpływa adsorpcja opóźniaczy w postaci grup karboksylowych $-COOH$ na ziarnach cementu. Udowodniono również, że związki spowalniające twardnienie zaczynu wpływają na wzrost i morfologię kryształów, między innymi zmiany w morfologii etryngitu [25].

Niewątpliwie substancja ma negatywny wpływ na proces wiązania i twardnienia zaczynu cementowego. Wpływa na niego opóźniająco oraz trwale obniża jego wytrzymałość. W przypadku betonów już 0,05% kwasu humusowego w stosunku do masy kruszywa obniża końcową wytrzymałość o około 20%. W skrajnych przypadkach może dojść do całkowitego zatrzymania hydratacji cementu [20]. Proces wiązania można przyspieszyć, stosując dodatkowe zasady (na przykład wapno), ale wiąże się to z obniżeniem końcowej wytrzymałości [34].

1.9. TEZA PRACY

Wychodząc z założenia, że zróżnicowany dodatek ilości cementu do naturalnego gruntu organicznego pozwala na uzyskanie odpowiednio wzmocnionego kompozytu grunt organiczny-cement o założonych parametrach geotechnicznych, autor sformułował następującą tezę: **istnieje związek fizyczny pomiędzy właściwościami geotechnicznymi składników, a parametrem wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie kompozytu grunt organiczny-spoivo cementowe.**

Znalezienie zależności między właściwościami geotechnicznymi składników kompozytu a jego wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie stanowi ważny element procesu projektowania wzmocnienia słabonośnego podłoża organicznego cementem z użyciem metod mieszania i daje możliwość oceny reakcji gruntu organicznego na stosowane spoiwo. W konsekwencji to pozwala na zaprojektowanie kompozytu gruntowego o określonych parametrach geotechnicznych.

1.10. CEL PRACY

Zasadniczym celem pracy jest:

- określenie zmian wytrzymałości kompozytu grunt organiczny-spoivo cementowe na jednoosiowe ściskanie w zależności od ilości dodawanego spoiwa i zawartości substancji organicznej,
- określenie postaci związków formalnych zależności wytrzymałości od składu kompozytu,
- uogólniona ocena skuteczności stosowania cementu w stabilizacji słabonosiwych gruntów organicznych o zmiennej zawartości substancji organicznej,
- usystematyzowanie wyników badań dla potrzeb projektowania parametrów wytrzymałościowych nowych kompozytów grunt organiczny-cement.

Jako dodatkowe zadania wnoszące nowe wyjaśnienia badawcze, które sformułowano w trakcie prowadzenia prób uważa się:

- mikroanalizę struktury kreowanych kompozytów w relacji do zawartości części organicznych,
- próbę możliwości niestandardowego zastosowania tomografii komputerowej (TK) do oceny niektórych parametrów fizycznych i struktury kompozytów.

1.11. ZAKRES PRACY

W ramach rozprawy doktorskiej przedstawiono studia literaturowe w zakresie tematyki pracy, zaplanowano kompleksowe, laboratoryjne badania identyfikacyjne gruntu pobranego do badań oraz projektowanych i analizowanych w pracy mieszanek kompozytowych. Praca ma charakter empiryczny. W zakresie prac znalazły się następujące zadania:

- analiza szczegółowych map geologicznych województwa kujawsko-pomorskiego i poszukiwanie odpowiedniego gruntu organicznego o możliwie najwyższej zawartości substancji organicznej oraz stopniu rozłożenia nie mniejszym niż H₃ według skali von Posta [89] jako materiału wyjściowego do dalszych badań,
- określenie wybranych parametrów mechanicznych pobranego gruntu *in situ*,
- określenie podstawowych cech fizycznych oraz zawartości substancji organicznej pobranego torfu w warunkach laboratoryjnych,
- określenie odczynu pH, zawartości węgla organicznego oraz składu frakcyjnego substancji próchnicznych, a szczególnie kwasów huminowych i fulwowych,
- analiza derywatograficzna torfu,
- stworzenie stanowisk badawczych zgodnych z powszechnie stosowaną oraz własną metodyką laboratoryjnych badań wytrzymałości kompozytu na jednoosiowe ściskanie,

- zaprojektowanie 20 mieszanek gruntowych na bazie pobranego torfu o zmiennej zawartości substancji organicznej (regulowanej dodatkiem piasku kwarcowego) i cementu,
- badanie wytrzymałości próbek cylindrycznych i sześciennych kompozytów gruntowych na jednoosiowe ściskanie przeprowadzonych na maszynach wytrzymałościowych (prasach) po 7 i 28 dniach dojrzewania,
- określenie modułów odkształceń i charakterystyk naprężenie-odkształcenie niszczonej próbek w badaniach na jednoosiowe ściskanie,
- badanie odczynu pH poszczególnych kompozytów,
- określenie zawartości kwasów humusowych w wybranych próbkach kompozytu po 28 dniach dojrzewania,
- analiza statystyczna wyników badań wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie,
- badania struktury wybranych, zniszczonych w badaniach na jednoosiowe ściskanie, cylindrycznych próbek kompozytów za pomocą tomografu komputerowego (TK),
- badania mikrostrukturalne wybranych, zniszczonych w badaniach na jednoosiowe ściskanie, cylindrycznych próbek kompozytów z użyciem skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM).
- wnioski z przeprowadzonych badań i analiz.

2. IDENTYFIKACJA BADANEGO GRUNTU

2.1. POCHODZENIE MATERIAŁU BADAWCZEGO

2.1.1. Charakterystyka ogólna miejsca pobrania

Torf do badań pobrano w dwóch partiach po około 450 kg każda w listopadzie 2010 i 2011 roku z terenu kopalni torfu KTK ŁABISZYN Sp. z o. o. Kopalnia zlokalizowana jest w województwie kujawsko-pomorskim we wsi Nowe Dąbie na południowy-zachód od Bydgoszczy (rys. 5).



Rys. 5. Lokalizacja miejsca pobrania materiału do badań [124]

Materiał do badań pobrano z torfowiska, które graniczy od zachodu z Kanałem Górnnoteckim i znajduje się w sąsiedztwie miejscowości Kobyłarnia (od wschodu) i Olimpin (od północy). Obszar ten znajduje się w obrębie leżących w depresji Bydgoskich Łąk Nadnoteckich i Łęgów Zielonki (rys. 6).



Rys. 6. Mapa topograficzna w skali 1:25000 z zaznaczonym miejscem pobrania materiału do badań [123]

Tereny między Ciechocinkiem nad Wisłą a okolicami Nakła nad Notecią noszą nazwę Kotliny Toruńskiej. Jest ona częścią rozległej i złożonej formy wklęsłej zwanej Pradolina Toruńsko-Eberswaldzką (Noteci-Warty) lub według innych źródeł Pradoliny Wisły-Noteci [1], której powstanie związane jest z subfazą krajeńsko-wąbrzeską i fazą pomorską ostatniego zlodowacenia. Oddziela ona pojezierza Południowopomorskie oraz Dobrzyńsko-Chełmińskie od Lubuskiego i Wielkopolskiego. W południowozachodniej części kotliny znajduje obniżenie, którego dnem płynie rzeka Notec oraz Kanał Górnotecki [24].

Omawiany teren leży w pasie wielkich dolin i znajduje się na obszarze doliny zalewowej Pradoliny Noteci-Warty (tarasu zalewowego) na granicy dorzecza Odry i Wisły. Kompleks ten zaliczany jest do doliny górnego biegu Noteci – od źródeł rzeki do Nakła. Największy wpływ na geomorfologię i warunki hydrogeologiczne miały w tym przypadku zlodowacenia. Krajobraz tego typu charakteryzuje się płytkim występowaniem wód gruntowych i okresowym zalaniem wodami rzecznyymi. Są tam siedliska roślinności typowej dla dolin zalanych wodami płynącymi takich jak lasy łęgowe *Populetalia albae* – Łęgi Zielonki i łąki typu zalewowego *Molinietalia caeruleae* – Bydgoskie Łąki Nadnoteckie. W licznych zagłębieniach i obniżeniach w warunkach silnego zawilgocenia powstają zbiorowiska turzycowe charakterystyczne dla torfowisk niskich, w które omawiane tereny obfitują. Torfowiska w dorzeczu górnej Noteci zajmują około 42% powierzchni doliny [24, 86, 126, 127].

2.1.2. Budowa geologiczna

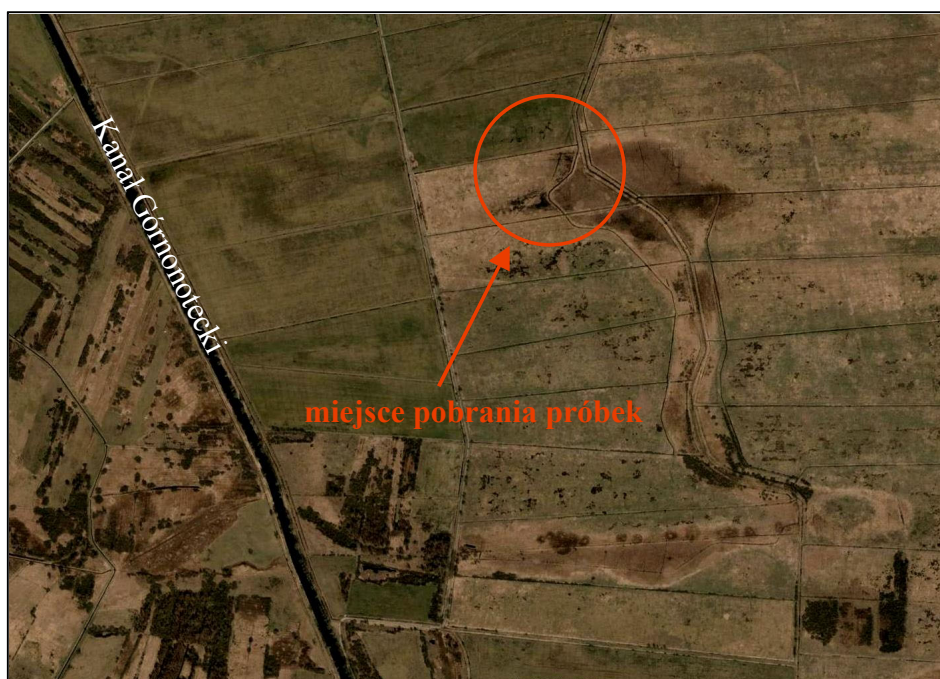
Miejsce, z którego pobrano próbki, jak i cała północna część Polski pokryta jest przez utwory czwartorzędu. Miąższość tych warstw w tym miejscu sięga 25 m, a miejscami 50 m. Jest to obszar akumulacji młodoholocenijskiej tarasu

zalewowego pradoliny Noteci – Warty. Występujące osady to przede wszystkim osady rzeczne, a w zasięgu ostatniego zlodowacenia i na jego przedpolu także glacyjofluwialne [24].

Stały dopływ wody, płytkie występowanie wód gruntowych oraz częściowo położenie w depresji względem Kanału Górmonoteckiego stworzyły dogodne warunki do powstania torfowisk o znacznej powierzchni. Zalegają tam torfowiska rzeczne zastoiskowe, jak i rozlewiskowe sprzyjające powstawaniu torfowisk trzcinowych. Torfowiska rzeczne w odróżnieniu od pojeziorowych mają zwykle mniejszą miąższość i nie występuje pod nimi gytia. W obniżeniach pradolinowych mogą też się tworzyć torfowiska niezwiązane z działalnością rzek. Występują tam zwykle torfy turzycowe, rzadziej drzewne i mszyste [11, 86].

W miejscu pobrania zalegają torfy na piaskach i żwirach rzecznych. Są to przede wszystkim torfowiska niskie, z przewagą torfów trzcinowo-turzycowych. Ich miąższość jest niewielka i waha się w tym rejonie od 1,0 do 2,5 m [48, 125].

Obszary te charakteryzują się trudnymi warunkami geologiczno-inżynierskimi. Płytkie występowanie wód gruntowych oraz słabonośnych gruntów organicznych praktycznie uniemożliwiają posadowienie bezpośrednie obiektów inżynierskich. Bardzo często pokłady torfu zalegają tuż pod powierzchnią terenu, co jest widoczne nawet na zdjęciach satelitarnych (rys. 7).



Rys. 7. Zdjęcie satelitarne miejsca pobrania gruntu [124]

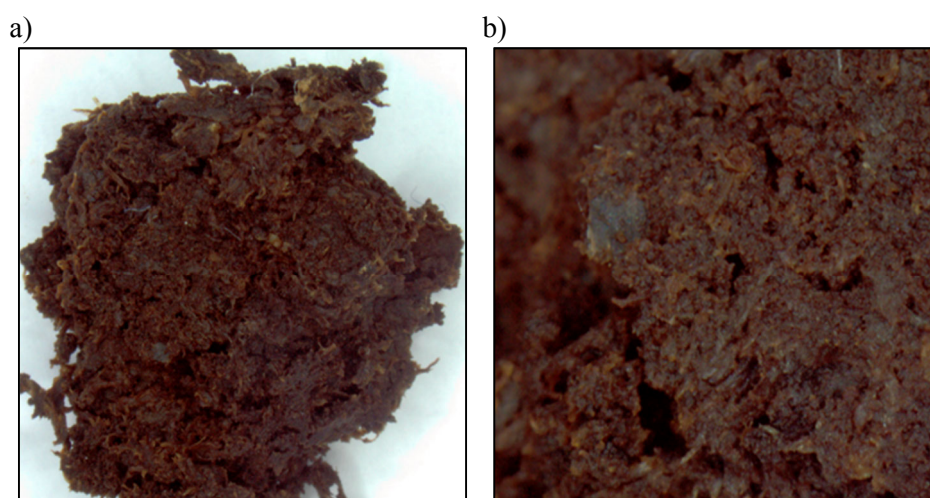
Próbki pobrano w miejscu gdzie, miąższość pokładów torfu była największa według pracowników kopalni i wynosiła około 2,0 m. Wykonano wykop badawczy i pobrano próbki poniżej torfotwórczej aktywnej warstwy torfu z głębokości 40-60 cm poniżej poziomu terenu (rys. 8). Torf transportowano i składowano w hermetycznych metalowych hobokach.



Rys. 8. Widok na torfowisko i wykop badawczy

2.2. ANALIZA MAKROSKOPOWA I MIKROSKOPOWA

Podczas pobierania gruntu przeprowadzono wstępną analizę makroskopową [31, 44, 89] w warunkach polowych. Dalszą mikroskopową ocenę wykonano w warunkach laboratoryjnych. Obserwacje laboratoryjne przeprowadzono za pomocą stereoskopowego mikroskopu optycznego udostępnionego podczas komercyjnej prezentacji sprzętu firmy OLYMPUS (rys. 9).



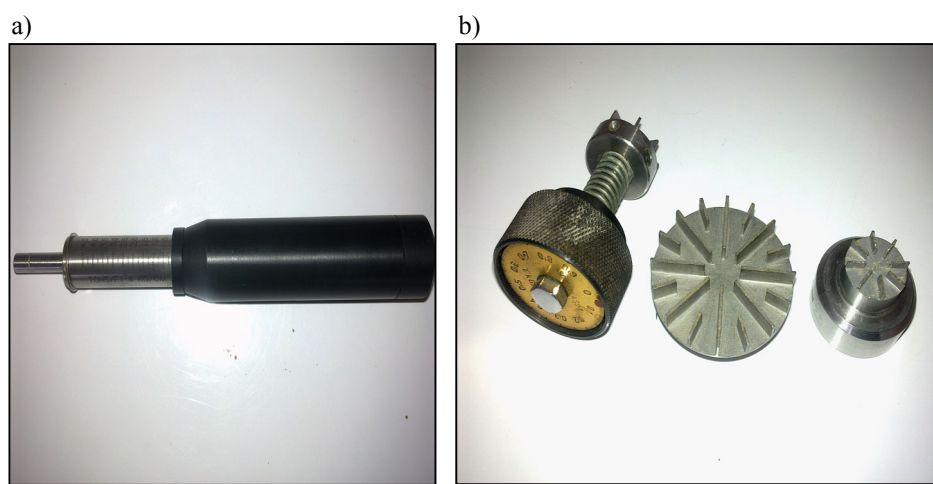
Rys. 9. Zdjęcia torfu wykonane mikroskopem optycznym: a) powiększenie 7x, b) powiększenie 20x

Pobrany torf ma ciemnobrązową barwę i widoczne nieuzbrojonym okiem struktury roślinne. Humus stanowi oddzielną część składową między dominującymi nierozłożonymi częściami roślin. Ściskany nie przechodzi przez palce, a wyciskana woda jest mętna, brązowa z widocznymi cząstkami humusu w zawiesinie. Zauważalna również jest słaba sprężystość. Grunt daje się walczkować, a podczas rozcierania wyraźnie brudzi ręce. Poddany działaniu 20% roztworem kwasu solnego (HCl) nie wykazuje żadnej reakcji, co świadczy o śladowej zawartości lub całkowitym niewystępowaniu węgla wapnia (CaCO_3).

2.3. WYNIKI BADAŃ OKREŚLONYCH *IN SITU*

Bezpośrednio w wykopie badawczym, poza badaniami makroskopowymi, przeprowadzono oznaczenie wybranych parametrów mechanicznych przy pomocy polowej aparatury kieszonkowej. Uzyskane wartości mają charakter wyłącznie wskaźnikowy przy założeniu, że kąt tarcia wewnętrznego $\phi_u=0^\circ$. Za pomocą penetrometru wciskowego PP (rys. 10a) określono w sposób umowny

graniczną siłę wciskania Q_f , a na jej podstawie zgodnie z instrukcją OBRTG z 1974 [32] stopień plastyczności I_L . Określono również wytrzymałość gruntu na ścinanie za pomocą ścinarki obrotowej TV typu SO-1 (rys. 10b) wyprodukowanej przez zakład doświadczalny OBRTG. Pozwoliło to na orientacyjne oznaczenie stopnia plastyczności I_L przy wykorzystaniu zależności korelacyjnej $I_L = f(\tau_f)$ [36]. Sposób przeprowadzenia oznaczeń i procedury badawcze zastosowano zgodnie z [107].



Rys. 10. Wykorzystane przyrządy kieszonkowe wykorzystane w badaniach *in situ*: a) penetrometr tłoczkowy (PP), b) ścinarka obrotowa (TV)

Uśrednione wyniki przeprowadzonych oznaczeń pobranego gruntu przedstawiono w tabeli 11.

Tabela 11. Wyniki oznaczeń przeprowadzonych przy użyciu penetrometru tłoczkowego (PP) i ścinarki obrotowej (TV)

Typ urządzenia	Rodzaj oznaczenia	Symbol	Jednostka	Wynik
Penetrometr tłoczkowy (PP)	Opór penetracji	Q_f	[kPa]	38,25
	Stopień plastyczności	I_L	-	0,53
Ścinarka obrotowa (TV)	Wytrzymałość na ścinanie	τ_f	[kPa]	22,56
	Stopień plastyczności	I_L	-	0,50- 0,75

2.4. WYNIKI BADAŃ ZAWARTOŚCI SUBSTANCJI ORGANICZNEJ

Ze względu na wysoką zawartość substancji organicznej (>10%) jej dokładną ilość określono za pomocą metody prażenia. Polega ona na spalaniu substancji organicznej w piecu w określonej temperaturze i oznaczeniu jej ilości na podstawie ubytku suchej masy badanego gruntu [107]. Temperatura prażenia wynosiła 440°C zgodnie z [115]. Jest to temperatura niższa od tej podawanej w innych normach np. [107], ale jest wystarczająca do wypalenia wyłącznie frakcji organicznej badanego gruntu. Według [115] w wyższych temperaturach niepożądanemu rozpadowi mogą ulegać niektóre minerały ilaste (ok. 550°C), węglany (650-900°C), a siarczki mogą się utleniać. Sposób przygotowania próbek jak i procedury badawcze zastosowano zgodnie z [107].

Zawartość substancji organicznej oznaczano dla każdej z partii gruntu pobranych w listopadzie 2010 i 2011 roku, dokładnie z tego samego miejsca. Średnie zawartości części organicznych badanego gruntu przedstawiono w tabeli 12.

Tabela 12. Średnie zawartości części organicznych w pobranym torfie metodą oznaczania strat prażenia

Data pobrania	Średnia zawartość części organicznych I_{om} [% suchej masy]
Listopad 2010	83,64
Listopad 2011	84,44

2.5. PODSTAWOWE CECHY FIZYKOCHEMICZNE GRUNTU

Podstawowe cechy fizyczne pobranego do badań gruntu oznaczono w laboratorium Katedry Geotechniki Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy. Sposób przygotowania próbek, a także sposób poszczególnych oznaczeń i podstawowe zależności zaczerpnięto z obowiązujących w Polsce norm [107] i specyfikacji technicznych [116, 117]. Pozostałe parametry fizyczne wyznaczono na podstawie ustalonych między innymi w [31, 32] zależności korelacyjnych wcześniej oznaczonych cech fizycznych. Metody pośrednie pozwalają uzyskać wyniki zbliżone do wartości ustalonych laboratoryjnie. Na potrzeby pracy oznaczono następujące cechy fizyczne:

- wilgotność naturalną,
- gęstość objętościową,
- gęstość objętościową szkieletu gruntowego,
- gęstość właściwą,
- porowatość,

- wskaźnik porowatości,
- granicę plastyczności,
- granicę płynności,
- wskaźnik plastyczności,
- stopień plastyczności,
- wskaźnik konsystencji.

Wilgotność naturalną oznaczono na 14 próbkach i w zależności od miejsca pobrania wynosi $w_n = 323,13-419,72\%$. Gęstość objętościową oznaczono na nienaruszonych próbkach pobranych bezpośrednio z wykopu badawczego za pomocą pierścienia o znanej objętości. Wartość tego parametru jest zmienna i wynosi $\rho = 1,01-1,09 \text{ g/cm}^3$. Gęstość objętościową szkieletu gruntowego oraz porowatość i wskaźnik porowatości określono, stosując powszechnie stosowane zależności przeliczeniowe. Gęstość właściwą ze względu na trudności w oznaczeniu w warunkach laboratoryjnych określono pośrednimi metodami obliczeniowymi za pomocą zależności H. Okruszki i A. W. Skemptona i D. J. Petleya. Podstawą obliczeń w obu wzorach jest zawartość części organicznych w badanym gruncie. Do dalszych obliczeń przyjęto bardziej niekorzystną wartość określoną za pomocą zależności A. W. Skemptona i D. J. Petleya.

W celu określenia stanu gruntu oznaczono granicę plastyczności i płynności. Na ich podstawie określono wskaźnik i stopień plastyczności oraz wskaźnik konsystencji. Badany torf był wystarczająco rozłożony, aby przeprowadzić oznaczenie granicy płynnością metodą Casagrande'a i granicy plastyczności jak dla mineralnych gruntów spoistych.

Analiza chemiczna polegała na oznaczeniu tylko wybranych cech związanych z tematyką rozprawy. Badania odczynu pH torfu przeprowadzono bezpośrednio w miejscu pobrania, a także w laboratorium Katedry Geotechniki Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy. Zawartość węgla organicznego oraz określenie składu frakcyjnego substancji próchnicznych zostały wykonane w laboratoriach Katedry Chemii Środowiska na Wydziale Rolnictwa i Biotechnologii. Oznaczenia przeprowadził mgr inż. Jarosław Pakuła. Oznaczono następujące cechy chemiczne:

- odczyn pH,
- ogólną zawartość węgla organicznego,
- zawartość węgla organicznego w kwasach huminowych i fulwowych oraz ich wzajemny stosunek.

Odczyn torfu oznaczono za pomocą pehametru HI 99121 firmy Hanna Instruments wyposażonego w elektrodę kombinowaną. Pomiary przeprowadzono zgodnie z dostarczoną przez producenta instrukcją. Analizę elementarną wykonano analizatorem Vario Max CN firmy Elementar na zasadzie wysokotemperaturowego spalania próby, natomiast skład frakcyjny substancji próchnicznych oznaczono metodą Schnitzera [39].

Wyniki wszystkich przeprowadzonych oznaczeń zestawiono w tabeli 13. Wszystkie wyniki poza wilgotnością naturalną i odczynem są wartościami średnimi.

Tabela 13. Zestawienie podstawowych cech fizykochemicznych pobranego torfu

	Rodzaj oznaczenia	Symbol	Jednostka	Wynik
Cechy fizyczne	Wilgotność naturalna	w_n	[%]	323,13- -419,72
	Gęstość objętościowa	ρ	[Mg/m ³]	1,04
	Gęstość objętościowa szkieletu gruntowego	ρ_d	[Mg/m ³]	0,21
	Gęstość właściwa	ρ_s	[Mg/m ³]	1,52
	Porowatość	n	[1]	0,86
	Wskaźnik porowatości	e	[1]	6,24
Konsystencja	Granica plastyczności	w_p	[%]	284,84
	Granica płynności	w_L	[%]	471,86
	Wskaźnik plastyczności	I_p	[%]	187,02
	Stopień plastyczności	I_L	[1]	0,58
	Wskaźnik konsystencji	I_c	[1]	0,42
Cechy chemiczne	Odczyn	pH	[1]	5,57- 6,09
	Zawartość węgla organicznego ogółem	C_{org}	[%]	47,04
	Zawartość węgla organicznego w kwasach huminowych	$C_{org f}$	[%]	35,91
	Zawartość węgla organicznego w kwasach fulwowych	$C_{org h}$	[%]	10,63
	Stosunek kwasów huminowych do fulwowych	$C_{org h} / C_{org f}$	[1]	3,38

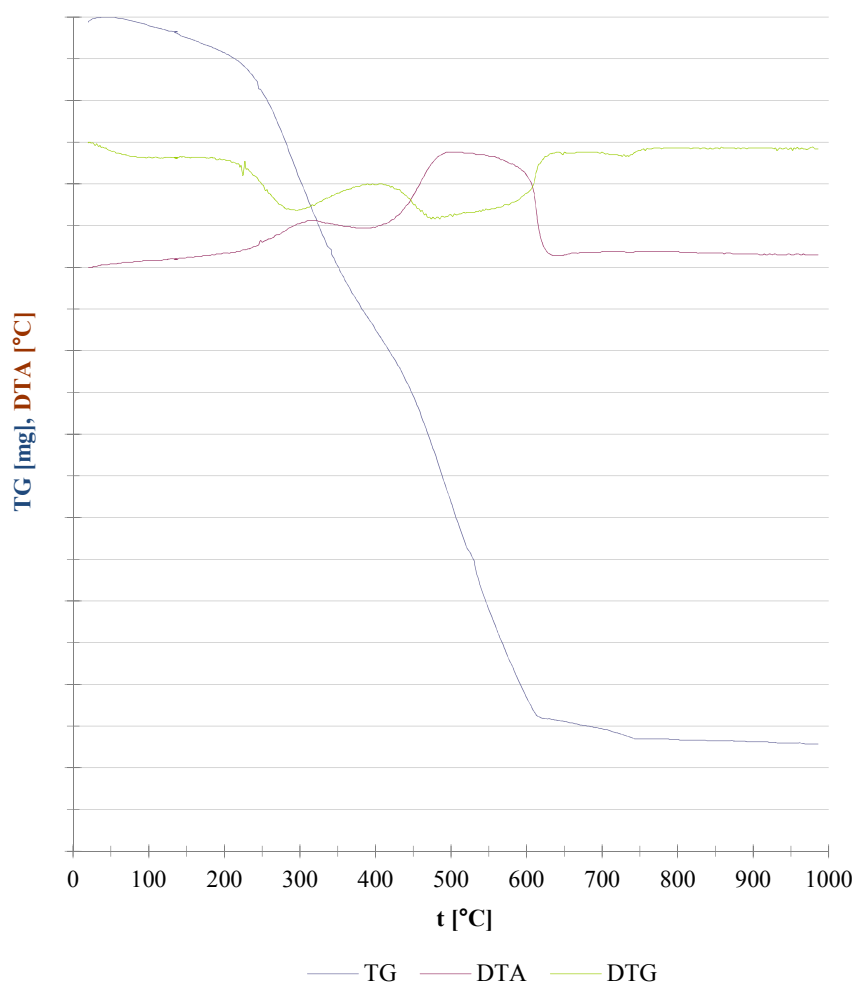
2.6. ANALIZA DERYWATOGRAFICZNA

Pobrano torf poddany został analizie termicznej TA (z ang. *Thermal Analysis*) za pomocą derywatografu. Próbkę została uprzednio wysuszone w temperaturze 105-110°C. Prędkość nagrzewania do 1000°C ustawiono na 5°C na minutę. Masa naważki wynosiła 100 mg. Oznaczenie zostało przeprowadzone na Wydziale Technologii i Inżynierii Chemicznej Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy.

Analiza termiczna pozwala określić skład mineralny badanego gruntu. Polega ona według [16] na: *badaniu efektów cieplnych i zmian wagowych zacho-*

dzących wskutek fizycznych i chemicznych przemian substancji pod wpływem zmian temperatury (nagrzewania, rzadziej studzenia). W przypadku torfu analiza ta ogranicza się praktycznie do określenia ubytku masy, w wyniku odwodnienia i procesów spalania substancji organicznej.

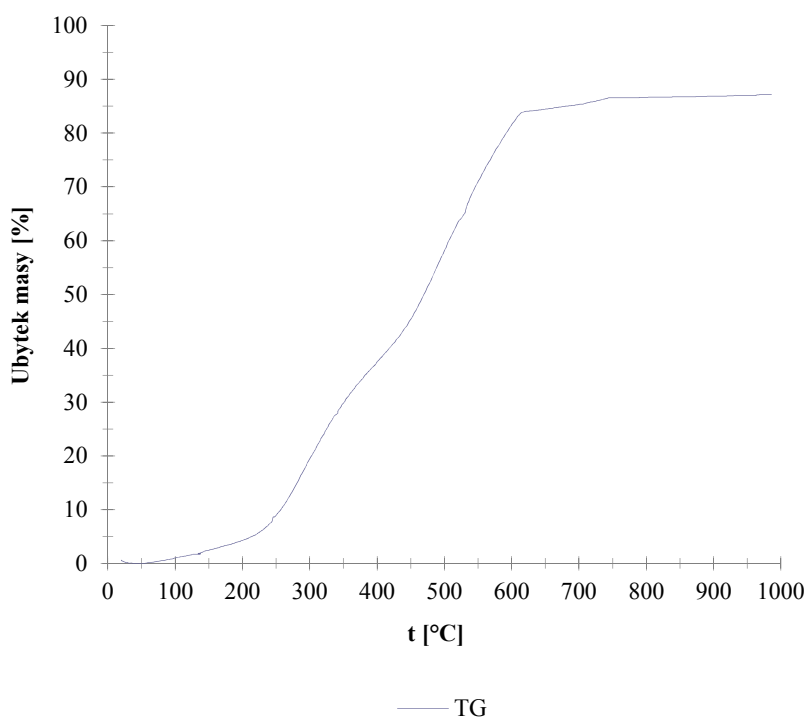
Badania derywatograficzne zaliczają się do technik pozwalających na jednoczesne uzyskanie na wykresie krzywej termicznej różnicowej DTA (z ang. *Differential Thermal Analysis*), krzywej termogravimetrycznej TG (z ang. *Thermogravimetry*) oraz krzywej termogravimetrycznej różnicowej DTG (z ang. *Differential Thermogravimetry*) [102]. Wyniki oznaczenia zostały przedstawione w formie derywatogramu na rysunku 11. Ze względu na liniowy przebieg wzrostu temperatury pominięto krzywą pomocniczą T na wykresie, a na osi odciętych zaznaczono temperaturę.



Rys. 11. Derywatogram pobranego do badań torfu

Na krzywej DTA widoczny jest szeroki efekt egzotermiczny (związany z wydzielaniem ciepła) z maksimum w temperaturze ponad 450°C. Na wykresie przedstawiony jest w postaci dwóch wychyleń krzywej termicznej w górę. Efekt ten wywołany jest utlenianiem składników organicznych badanego torfu, dominujących w jego składzie [16]. Można przypuszczać, że pierwsza reakcja egzotermiczna związana jest z utlenianiem grup funkcyjnych, a druga z rozkładem jądra aromatycznego kwasów huminowych [31, 39].

Na podstawie krzywej TG można dokładnie określić straty wagowe przy poszczególnych reakcjach zachodzących w wyniku zmian temperatury. Standardowo na derywatogramie krzywa ta rejestruje w miligramach ilościowy wynik analizy wagowej w stosunku do temperatury. Dla ułatwienia przeliczono tę krzywą z miligramów na procent strat masy w stosunku do jej pierwotnej masy (rys. 12).



Rys. 12. Krzywa przedstawiająca ubytek masy w wyniku zmian temperatury

Największy ubytek masy następuje w zakresie temperatur około 220-600°C, a jej wartość końcowa stabilizuje się przy około 84-87% ubytku masy. Wartości te zbliżone są do zawartości substancji organicznej oznaczonej w punkcie 2.5.

2.7. CHARAKTERYSTYKA MATERIAŁU BADAWCZEGO NA PODSTAWIE PRZEPROWADZONYCH BADAŃ

Przeprowadzone badania polowe i laboratoryjne pozwoliły dokładnie zidentyfikować pobrany grunt. Oznaczone parametry umożliwiły ocenę jego przydatności jako podłoża budowlanego, a także wyjściowego materiału do dalszych analiz.

Analiza geograficzna i geologiczna miejsca pobrania wskazują, że jest to torf niski, turzycowo-trzciniowy. Struktura, barwa oraz charakter substancji organicznej pozwalają stwierdzić, że jest mało rozłożony, włóknisty o stopniu humifikacji według skali von Posta równym H_3/H_4 [89].

Otrzymane wartości parametrów fizycznych, jak i chemicznych oraz zawartość substancji organicznej mieszczą się w zakresie wartości oczekiwanych dla torfów niskich [31, 81].

Przeprowadzone oznaczenia *in situ* aparaturą kieszonkową wskazują, że grunt charakteryzuje się małą wytrzymałością na ścinanie i znajduje się w stanie miękkoplastycznym. Potwierdzają to badania laboratoryjne. Stopień plastyczności badanego torfu I_L i wskaźnik konsystencji I_c wynosi odpowiednio 0,58 i 0,42, co według [106, 110] oznacza stan miękkoplastyczny.

Niewielka wytrzymałość (bez odpływu) na ścinanie ($\tau_f = 22,56$ kPa), wysoka wilgotność naturalna ($w_n = 323,13-419,72\%$), stan miękkoplastyczny oraz wynikające z włóknistej struktury zdolności do niekontrolowanych osiadań powodują, że badany grunt można uznać za słabonośny. Grunt taki w stanie naturalnym nie nadaje się do bezpośredniego posadowienia jakichkolwiek obiektów inżynierskich.

3. METODYKA BADAŃ KOMPOZYTU

3.1. PROGRAM METODYKI BADAŃ

Zasadniczym celem naukowym badań jest ocena praktycznej skuteczności stosowania cementu do wzmacniania gruntów słabonośnych o różnej zawartości substancji organicznej. Podstawowym składnikiem kompozytu jest torf o średniej naturalnej zawartości substancji organicznej $I_{om} = 83,64-84,40\%$. Zawartość substancji organicznej w realizowanych badaniach jest regulowana poprzez dodawanie określonej ilości obojętnego chemicznie piasku kwarcowego, to znaczy, że wraz ze wzrostem zawartości części mineralnych zmniejszany jest udział substancji organicznej. Ilość dodawanego cementu określono w odniesieniu do masy gruntu suchego jako stosunek m_c/m_s . Dodatkowo w każdym punkcie badawczym obliczano rzeczywistą wartość wskaźnika w/c , który jest podstawowym parametrem przy projektowaniu mieszanek betonowych.

Zaprojektowano 20 różnych receptur kompozytu o zmiennej zawartości substancji organicznej I_{om} w zakresie od 20, 40, 60% do jej naturalnej zawartości średnio 83,64-84,40% i przyjętym stosunku $m_c/m_s = 0,75, 1,25, 1,75, 2,25, 2,75$. Jak wcześniej wspomniano celem badań jest ocena skuteczności stosowania cementu w stabilizacji gruntów organicznych poprzez określenie wytrzymałości kompozytów na jednoosiowe ściskanie. Zmienną zależną jest wytrzymałość na ściskanie σ , natomiast stosunek m_c/m_s , wskaźnik w/c oraz zawartość substancji organicznej I_{om} są zmiennymi niezależnymi według wzoru 1:

$$\sigma = f(m_c/m_s; w/c; I_{om}) \quad (1)$$

gdzie:

- σ – wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie,
- m_c/m_s – stosunek masy cementu do suchej masy gruntu,
- w/c – stosunek masy wody do masy cementu,
- I_{om} – zawartość substancji organicznej.

Do badań użyto próbek w kształcie sześciątów 150x150x150 mm oraz walców z podstawami kołowymi o średnicy $\Phi 71$ mm. Dla uproszczenia te ostatnie będą dalej nazywane cylindrycznymi. Wytrzymałość badano po 7 i 28 dniach dojrzewania w komorze wilgotnościowej lub w wodzie w zależności od przyjętej metody. Próbki dojrzewają pod obciążeniem 18 kPa, które odpowiada temu stosowanemu w warunkach rzeczywistych [50].

Na potrzeby badań przystosowano jedno z pomieszczeń laboratoriów Katedry Geotechniki UTP w Bydgoszczy (rys. 13).



Rys. 13. Przystosowane na potrzeby badań pomieszczenie do badań kompozytów gruntowych

Dla poznania zjawisk fizykochemicznych detereminujących zmiany wytrzymałości poszczególnych kompozytów przeprowadzono badania składu chemicznego kompozytów, odczynu pH, a także badania struktury i mikrostruktury za pomocą tomografu komputerowego (TK) oraz elektronowego mikroskopu skaningowego (SEM). Procedura przygotowania próbek (formowanie i dojrzewanie), a także sposób ich oznaczenia (K1-K20) były identyczne dla wszystkich prowadzonych badań.

3.2. WYBÓR SPOIWA DO STABILIZACJI

Jako spoiwo do stabilizacji wybrano cement, który jest najchętniej stosowanym spoiwem hydraulicznym do wzmocnienia gruntów organicznych. Jak pokazują wyniki badań, cement z granulowanym żużlem wielkopieczowym, jak i sam cement dają najlepszy efekt wzmocnienia wysokoorganicznych gruntów słabonośnych [53]. Dla stabilizacji gruntów kwaśnych o odczynie $\text{pH} < 5$ i zawierających siarczany $\text{SO}_4 > 1\%$ zaleca się stosowanie cementu hutniczego (CEM III) [37]. Według innych źródeł najlepszy efekt wzmocnienia gruntu organicznego uzyskuje się przy zastosowaniu cementu portlandzkiego żużlowego (CEM II) [79]. Kompozyty z użyciem wyżej wymienionych cementów dają zbliżony efekt wzmocnienia, dlatego do dalszych badań wybrano najłatwiej dostępny cement portlandzki popiołowy o wysokiej wytrzymałości wcześniejszej – CEM II/B-V 32,5R. Dzięki uprzejmości producenta cementu firmy Dycerhoff Polska Sp. z o.o. udostępniono na potrzeby pracy średnie roczne wartości wyników badań kontrolnych dla zastosowanego cementu, które zestawiono w tabeli 14.

Tabela 14. Średnie wartości wyników badań kontrolnych cementu CEM II/B-V 32,5R w 2011 roku, udostępnione przez Dyckerhoff Polska Sp. z o.o.

Parametr	Jednostka	Wynik
Wodoządnosc	[%]	30,0
Początek wiązania	[min.]	261
Koniec wiązania	[min.]	348
Stała objętości (Le Chatelier)	[mm]	0,56
Wytrzymałość wczesna (N ₂)	[MPa]	17,3
Wytrzymałość normowa (N ₂₈)	[MPa]	44,6
Powierzchnia właściwa wg Blaine'a	[cm ² /g]	3565
Pozostałość nierozpuszczalna	[%]	25,29
Straty prażenia	[%]	2,96
SO ₃	[%]	2,50
SiO ₂	[%]	30,18
Al ₂ O ₃	[%]	11,68
Fe ₂ O ₃	[%]	4,14
CaO	[%]	43,64
MgO	[%]	2,02
Na ₂ O	[%]	0,46
K ₂ O	[%]	1,63
Cl	[%]	0,045

3.3. ZAŁOŻENIA DO METODYKI BADAŃ

Przyjęta metodyka badań wytrzymałości kompozytów na jednoosiowe ściskanie oparta jest na założeniach, które można podzielić na wstępne i szczegółowe.

Wstępne założenia teoretyczne:

- grunt organiczny stabilizowano metodą „na sucho” cementem portlandzkim popiołowym klasy 32,5R-CEM II/B-V,
- proporcje mieszanki oparto na wymaganiach metod wglębnego mieszania gruntu „na sucho” [45], wskaźniku w/c dla betonu [20, 21] oraz kryterium ekonomiczności,

- przyjęto, że w warunkach rzeczywistych kompozyty pracować będą na jednoosiowe ściskanie, dlatego w warunkach laboratoryjnych badania wytrzymałościowe przeprowadzono w stanie jednoosiowego ściskania.

Szczegółowe założenia:

- założono 20 zróżnicowanych receptur kompozytu,
- ilość dodawanego cementu zgodnie z założeniami technicznymi metod mieszania gruntu na sucho oraz własnej metodyki badań, obliczona na zasadzie wyznaczenia stosunku m_c/m_s ,
- do badań wykonano i użyto ponad 280 próbek, tj. po 14 dla każdego kompozytu, w tym 7 sześciennych 150x150x150 mm i 7 cylindrycznych $\Phi 71$ mm,
- wilgotności gruntu spełniały zależność $w_n > 60\%$ zgodnie z wymaganiami metod wglębnego mieszania gruntu na sucho [45],
- próbki cylindryczne były formowane i składowane opierając się na metodzie fińskiej [53], próbki sześciennie według własnej metodyki badań,
- próbki zagęszczono statycznie warstwami naprężeniem normalnym 18kPa,
- próbki dojrzewały pod stałym obciążeniem odpowiadającym naprężeniu normalnemu 18 kPa,
- badania wytrzymałościowe wykonano na maszynie wytrzymałościowej ZD10/90, I kl. dokładności,
- badania wytrzymałości próbek wykonano po 7 i 28 dniach dojrzewania.

3.4. PROJEKTOWANIE SKŁADU MIESZANKI

Receptura cementogruntu jest połączeniem wymagań metod wglębnego mieszania gruntów, podstaw projektowania betonów oraz doświadczeń zebranych podczas wcześniejszych badań prowadzonych w Katedrze Geotechniki Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy.

Optymalne wartości współczynnika w/c dla betonu zwykłego powinny się zawierać w przedziale 0,2-0,7 [20, 21]. W przypadku wzmacniania gruntów metodami mieszania *in situ* wartości te zawierają się w zależności od technologii w granicach 0,6-2,5.

Biorąc pod uwagę skrajne wartości współczynnika w/c dla betonu i metod mieszania *in situ*, ograniczenia związane z wymaganiami metody mieszania gruntów na „na sucho”, a także wprowadzone kryterium ekonomiczności, wprowadzono następujące ograniczenia dla receptur:

- wartość współczynnika wody do cementu (w/c) zawierała się w zakresie 0,2-2,5,
- wilgotność naturalna stworzonych kompozytów gruntowych była większa od 60%,
- masa mieszanki torfu i piasku kwarcowego nie przewyższa masy dodanego cementu.

Dzięki zastosowanym ograniczeniom zmniejszono ilość receptur do 20, przedstawiono w tabeli 15. Dla uproszczenia w dalszej części pracy kompozyty 1-20 oznaczone będą odpowiednio symbolami K1-K20.

Tabela 15. Uproszczony zakres badań wytrzymałości kompozytów dla przyjętych zmieni-nych niezależnych

Receptura		Stosunek masy cementu do suchej masy gruntu m_c/m_s				
		0,75	1,25	1,75	2,25	2,75
Zaawartość substancji organicznej I_{om} [%]	20	Kompozyt K1	Kompozyt K2	Kompozyt K3	Kompozyt K4	Kompozyt K5
	40	Kompozyt K6	Kompozyt K7	Kompozyt K8	Kompozyt K9	Kompozyt K10
	60	Kompozyt K11	Kompozyt K12	Kompozyt K13	Kompozyt K14	Kompozyt K15
	naturalne	Kompozyt K16	Kompozyt K17	Kompozyt K18	Kompozyt K19	Kompozyt K20

W celu porównania uzyskanych wyników przeprowadzonych badań własnych z innymi w tabeli 16 przedstawiono zawartość cementu i piasku kwarcowego w kg/m^3 torfu dla poszczególnych receptur obliczonych dla średniej wilgotności naturalnej torfu, a także obliczono stosunek wody do cementu w/c. Wartości te mają charakter poglądowy, ponieważ w czasie kilkunastomiesięcznych badań każdorazowo określano wilgotność naturalną konkretnej partii torfu i na tej podstawie wyznaczano udział poszczególnych składników.

Tabela 16. Zawartość cementu (C) i piasku kwarcowego (P) wyrażona w kg/m^3 torfu w poszczególnych mieszankach oraz stosunek w/c

Receptura		Stosunek masy cementu do suchej masy gruntu m_c/m_s				
		0,75	1,25	1,75	2,25	2,75
Zaawartość substancji organicznej I_{om} [%]	20	C: 691,93 P: 701,97 w/c: 1,18	C: 1153,21 P: 701,97 w/c: 0,71	C: 1614,51 P: 701,97 w/c: 0,51	C: 2075,79 P: 701,97 w/c: 0,39	C: 2537,07 P: 701,97 w/c: 0,32
	40	C: 345,96 P: 240,68 w/c: 2,37	C: 576,61 P: 240,68 w/c: 1,42	C: 807,25 P: 240,68 w/c: 1,02	C: 1037,89 P: 240,68 w/c: 0,79	C: 1268,54 P: 240,68 w/c: 0,65
	60	C: 230,64 P: 86,92 w/c: 3,55	C: 384,40 P: 86,92 w/c: 2,13	C: 538,17 P: 86,92 w/c: 1,52	C: 691,93 P: 86,92 w/c: 1,18	C: 845,69 P: 86,92 w/c: 0,97
	naturalne	C: 172,98 P: - w/c: 4,74	C: 288,30 P: - w/c: 2,84	C: 403,63 P: - w/c: 2,03	C: 518,95 P: - w/c: 1,58	C: 634,27 P: - w/c: 1,29

3.5. SPOSÓB PRZYGOTOWANIA I DOJRZEWANIA PRÓBEK

3.5.1. Próbki cylindryczne

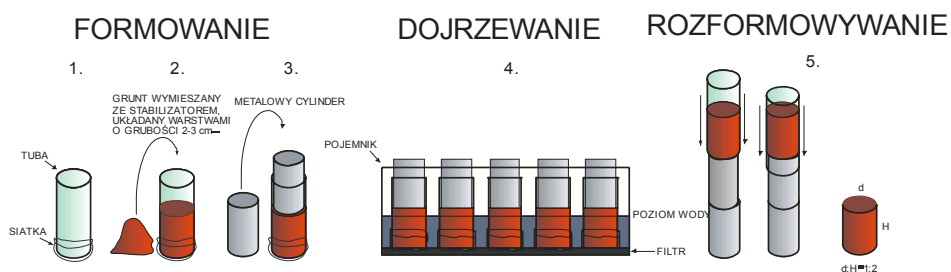
Procedura przygotowania cylindrycznych próbek kompozytu oparta jest na wytycznych metody fińskiej [53], doświadczeń innych badaczy [90] oraz projekcie EuroSoilStab [104]. Na ich podstawie przygotowano stanowisko do badań (rys. 14). Zastosowano formy o średnicy $\Phi 71$ mm i wysokości 140 mm. W celu wywarcia założonego ciśnienia na wiążący kompozyt, użyto grawitacyjnych odważników oddziałujących ciśnieniem 18 kPa.



Rys. 14. Stanowisko do badań wykonane według wytycznych metody fińskiej [53]

Próbki były formowane i dojrzewały w laboratoriach Katedry Geotechniki UTP w Bydgoszczy. Zgodnie z rysunkiem 15 procedura jest następująca:

1. Założono siatki na dolną część tuby, które umożliwiły swobodny dopływ wody do każdej z próbek.
2. Mieszanie wzmacnianego gruntu ze stabilizatorem trwało do momentu uzyskania jednorodnej masy oraz wypełnienia tub kompozytem.
3. Próbki obciążono metalowym cylindrem (odważnikiem).
4. Umieszczono próbki w pojemniku w pozycji pionowej, pojemnik wypełniono wodą.
5. Próbki wyjęto z tub po założonym okresie dojrzewania.



Rys. 15. Procedura przygotowania próbek cylindrycznych kompozytu [53, 90, 104]

3.5.2. Próbkę sześciennie

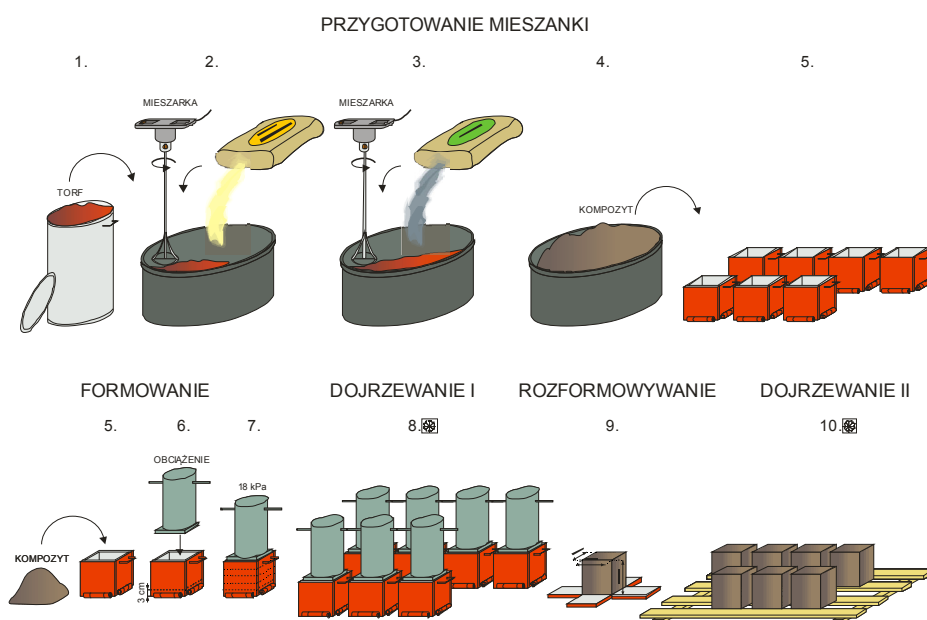
Procedura przygotowania próbek sześciennych jest autorska i opracowana na potrzeby pracy. Sposób formowania i dojrzewania został oparty na wytycznych dotyczących warunków dojrzewania i formowania próbek betonowych [20, 111, 112, 113], doświadczeniach innych badaczy [50] oraz doświadczeniach własnych z wcześniej prowadzonych badań. Do badań zastosowano formy sześciennie przystosowane do badań niszczących betonu o wymiarach 150x150x150 mm oraz wykonane na potrzeby badań grawitacyjne odważniki oddziałujące na wiązany kompozyt ciśnieniem 18 kPa (rys. 16).



Rys. 16. Zastosowane do badań formy sześciennie o wymiarach 150x150x150 mm i odważniki

Próbki były formowane i dojrzewały przez pierwsze 48 godzin w laboratoriach Katedry Geotechniki UTP w Bydgoszczy. Po tym czasie rozformowano je i przeniesiono na pozostały czas dojrzewania do komory wilgotnościowej Zakładu Badawczo-Doświadczalnego Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska UTP w Bydgoszczy. Zgodnie z rysunkiem 17 procedura jest następująca:

1. Pobrano i przygotowano próbki torfu do badań.
2. Mieszanie wzmacnianego gruntu z piaskiem kwarcowym trwało 2 minuty do momentu uzyskania jednorodnej masy.
3. Dodano stabilizator i kontynuowano mieszanie przez kolejne 2 minuty do momentu uzyskania jednorodnej masy.
- 4, 5. Warstwami wypełniono (ok. 3 cm) formy kompozytem.
6. Zagęszczono statycznie każdą z warstw metalowym odważnikiem.
7. Próbkę obciążono metalowym cylindrem.
8. Próbkę dojrzewały w formach próbek przez 48 h.
9. Następowo rozformowano próbkę.
10. Próbkę dojrzewały przez 7 lub 28 dni w komorze wilgotnościowej o wilgotności względnej $>90\%$ i temperaturze $+18^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$.



Rys. 17. Procedura przygotowania próbek sześciennych kompozytu

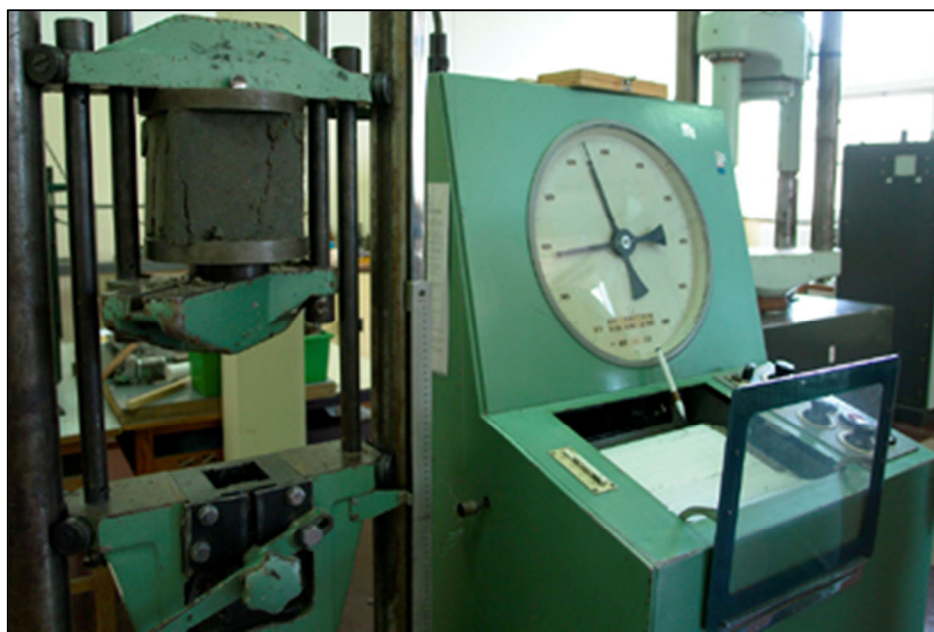
4. BADANIA KOMPOZYTU

4.1. LABORATORYJNE BADANIA WYTRZYMAŁOŚCI KOMPOZYTU NA JEDNOOSIOWE ŚCISKANIE

4.1.1. Opis aparatury i stanowiska pomiarowego

Badania wykonano w Zakładzie Badawczo-Doświadczalnym Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska UTP w Bydgoszczy. Do badań użyto prasy obciążeniowej ZD10/90, I kl. dokładności wyprodukowanej przez niemieckie zakłady Fritz HECKERT (rys. 18). Maszyna ta przystosowana jest do przeprowadzania prób rozciągania, ściskania i zginania na materiałach i częściach konstrukcyjnych, w tym również próbek betonowych. Urządzenie obsługiwane było przez Pana Wiesława Kajdasza. Wybrane nastawy urządzenia:

- przestrzeń robocza dla prób rozciągania: 400x900 mm,
- przestrzeń robocza dla prób ściskania: 300x212 mm,
- przesuw śruby: 900 mm,
- szybkość odsuwu dolnej głowicy mocującej,
- bezstopniowa regulacja przesuwu w zakresie 0,5-15 mm/min,
- zakres pomiaru siły: 0-100kN.



Rys. 18. Prasa obciążeniowa ZD 10/90, I kl. dokładności wykorzystana do badań wytrzymałości kompozytów na jednoosiowe ściskanie

Na potrzeby badań przygotowano płyty dociskowe o wymiarach odpowiadających przekrojom badanych próbek. Jedna z płyt dociskowych miała sferyczne łożysko, umożliwiające odpowiednie ułożenie próbki. Zastosowane urządzenie umożliwiało przykładanie obciążenia ze stałą prędkością. Przed rozpoczęciem badania każdorazowo sprawdzano równoległość płyt dociskowych.

4.1.2. Metoda pomiaru

Przeprowadzone badania wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie miały na celu określenie podstawowych parametrów wytrzymałościowych badanych kompozytów za pomocą prasy obciążeniowej. Określono naprężenia niszczące, moduły odkształceń, a także przedstawiono wykresy zależności naprężeń do odkształceń σ - ϵ , umożliwiające obserwację zachowania się poszczególnych kompozytów pod obciążeniem. Parametry te określono dla wszystkich kompozytów.

W przypadku sporządzania wykresów zależności naprężeń od odkształceń σ/ϵ wprowadzono w nich poprawki pomijające „układanie się” próbek w początkowej fazie badań (rys.19). Zniekształcenia te spowodowane są przede wszystkim przez dopasowanie się silnie chropowatych podstaw próbek kompozytu do płyt prasy. Może to prowadzić do oznaczenia fałszywych parametrów odkształcalności. O zjawisku tym wspomniano między innymi w projekcie Eurosoilstab [104].



Rys. 19. Widoczne nierówności podstaw próbek kompozytu na styku z płytą dociskową

Podczas prowadzenia oznaczeń zastosowano wytyczne z załącznika W normy [115] dla materiału skalnego, specyfikacji technicznej [118] oraz projektu Eurosoilstab [104].

4.1.3. Określenie wytrzymałości próbek kompozytu

Określenie wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie w początkowej fazie badań zostało określone zarówno dla próbek cylindrycznych, jak i sześciennych. Z racji ograniczeń sprzętowych oraz ograniczonego czasu w laboratorium wykonywano 5 prób 7-dniowych i jedynie 2 próby pozostawiano na 28 dni. W przypadku próbek sześciennych pojawiło się w czasie oznaczeń wiele dodatkowych czynników wpływających na ich końcową wytrzymałość, w tym między innymi:

- występowanie pleśni na próbkach o wysokiej zawartości substancji organicznej i małym udziale cementu,
- efekt wyciskania wody z form pod obciążeniem dla próbek o małym udziale cementu,
- trudności z uzyskaniem próbek o jednakowych wymiarach.

Wpływ pleśni na wytrzymałość kompozytów gruntowych jest trudny do określenia, trudno również określić zasięg jej oddziaływania. W literaturze zjawisko to nie zostało jak dotąd opisane w odniesieniu do badań laboratoryjnych kompozytów (według wiedzy autora). Szybkiemu rozwojowi pleśni sprzyjała z pewnością wysoka wilgotność i temperatura w komorze wilgotnościowej. Pleśń występowała przede wszystkim w próbkach o wysokiej zawartości substancji organicznej po 28 dniach dojrzewania. Na rysunkach 20 i 21 przedstawiono próbki sześciennie kompozytu K16 i K18 o naturalnej zawartości substancji organicznej i stosunku $m_c/m_s = 0,75$ i $1,75$. Występowanie pleśni było całkowicie nieprzewidywalne. Możliwe, że zarodniki pleśni były już w torfie na etapie pobierania lub rozwinęły się w czasie składowania lub dojrzewania. Zaobserwowano jedynie, że pleśń nie wystąpiła w przypadku próbek o zawartości substancji organicznej niższej od 60% i stosunku m_c/m_s wyższym od 1,75. Nie było jej również na próbkach cylindrycznych, z racji ograniczonego dostępu powietrza w czasie dojrzewania.



Rys. 20. Próbkę sześcienną kompozytu K16 o naturalnej zawartości substancji organicznej pokrytą pleśnią po 28 dniach dojrzewania



Rys. 21. Próbkę sześcienną kompozytu K18 o naturalnej zawartości substancji organicznej pokrytą pleśnią po 28 dniach dojrzewania

Innym zaobserwowanym zjawiskiem było wydatne wyciskanie się wody dla kompozytów o stosunku masy dodawanego cementu do masy suchego gruntu m_c/m_s mniejszym niż 1,25 i zawartości substancji organicznej I_{om} większej niż 40%, ale nie było to regułą. Wyciskanie wody powodowało duże zmniejszenie wilgotności tych kompozytów już w czasie pierwszych dwóch dni dojrzewania pod obciążeniem. W konsekwencji zachodziło znaczne zmniejszenie objętości próbek. Najbardziej widoczne było to w przypadku kompozytu K16 po 7 dniach dojrzewania (rys. 22).



Rys. 22. Próbką sześcienna kompozytu K16 o naturalnej zawartości substancji organicznej pokryta pleśnią po 7 dniach dojrzewania.

Formowanie i rozformowanie próbek sześciennych było znacznie trudniejsze niż próbek cylindrycznych. Mimo stosowania, w przypadku obu kształtów form, tego samego środka antyadhezyjnego liczba zniszczonych w czasie rozformowywania próbek sześciennych była wysoka. Zmniejszony przekrój z pewnością miał wpływ na końcową wytrzymałość kompozytu.

Rozkład wytrzymałości próbek sześciennych na jednoosiowe ścisnienie jest trudny do interpretacji. Przeprowadzone badania w warunkach laboratoryjnych pokazały, że w przypadku próbek o zawartości substancji organicznej I_{om} większej od 40% większa ilość dodanego cementu nie musi powodować wzrostu ich wytrzymałości. Trudno ocenić, jaki na to wpływ miały omówione powyżej czynniki zaobserwowane w czasie procesu formowania i dojrzewania.

Ostatecznie w dalszej części pracy zrezygnowano z analizy wyników badań próbek sześciennych ze względu na brak możliwości ich miarodajnej oceny. Wymagają one dalszych badań w celu zrozumienia i opisanie wszystkich czynników, mających wpływ na ich końcową wytrzymałość. Wszelkie badania przeprowadzone i omówione w dalszej części pracy dotyczą wyłącznie próbek cylindrycznych.

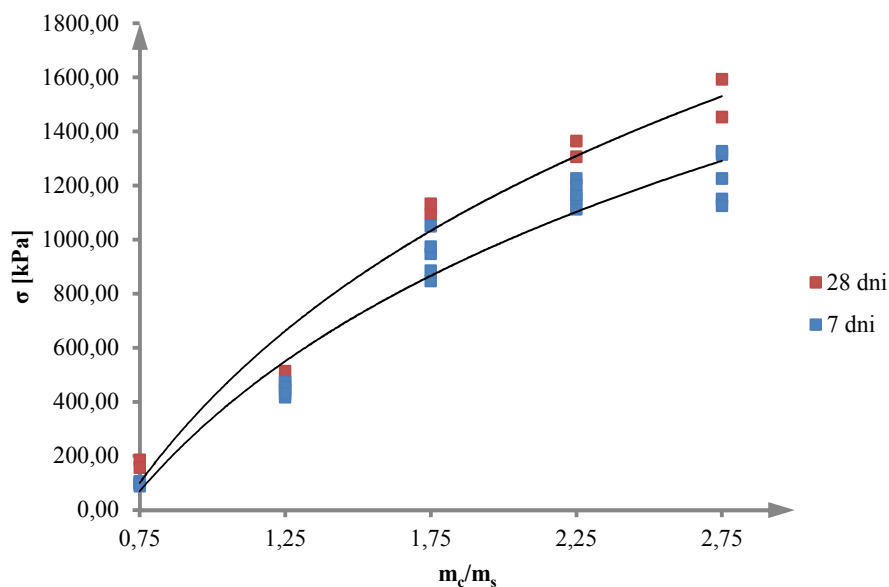
Zestawienie tabelaracne wyników badań wytrzymałości próbek cylindrycznych zamieszczono w załączniku 1. Wyniki badań wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie próbek sześciennych w celach poglądowych zamieszczono w postaci wykresów w załączniku 2.

4.1.4. Zestawienie wyników badań

4.1.5.1. Wytrzymałość na ściskanie

Wyniki badań wytrzymałościowych na jednoosiowe ściskanie próbek cylindrycznych po 7 jak i 28 dniach przedstawiono na rysunkach 23-26. Przyjęto, że oczekiwaną minimalną wartością wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie badanych kompozytów jest 100 kPa. Są to najniższe przeciętne wytrzymałości kompozytów po 28 dniach dojrzewania wykonanych na bazie osadów nawodnionych i gruntów organicznych [98].

Prawie wszystkie kompozyty o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 20\%$ już po 7 dniach dojrzewania osiągnęły wartości wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie powyżej 100 kPa, (rys. 23). Związane jest to z bardzo dużą ilością dodawanego cementu. Dla osiągnięcia w mieszance zawartości substancji organicznej I_{om} na poziomie 20%, należy dodać do torfu dużą ilość piasku kwarcowego o wysokiej masie (również po wysuszeniu). W konsekwencji w celu otrzymania założonego stosunku m_c/m_s , ilość spoiwa jest znacznie wyższa niż w przypadku pozostałych kompozytów.

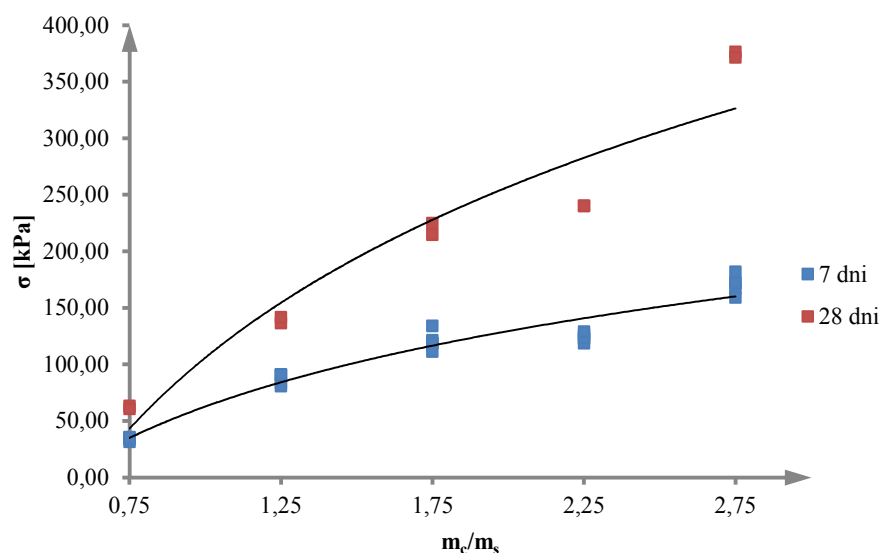


Rys. 23. Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie próbek cylindrycznych kompozytu K1-K5 o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 20\%$ w zależności od stosunku masy dodawanego cementu do masy suchego gruntu m_c/m_s

Wysokie wartości wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie dla najmocniejszej mieszanki o $m_c/m_s = 2,75$ po 7 dniach zawarte były w przedziale 1123,97-1326,03 kPa. Najslabsze z kolei, przy stosunku $m_c/m_s = 0,75$ osiągnęły wartości w granicach 88,40-106,08 kPa. Po 28 dniach, zgodnie z oczekiwaniami, nastąpił wzrost wartości wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie w porównaniu z próbkami badanymi po 7 dniach dojrzewania. Największy, gdyż około 74% przyrost zaobserwowano w przypadku kompozytu K1 o $m_c/m_s = 0,75$. Wzrost średniej wytrzymałości w przypadku pozostałych kompozytów K2-K4 o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 20\%$ nie był już gwałtowny i wyniósł odpowiednio około 11%, 18%, 14% i 24%.

Kompozyty K6-K10 o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 40\%$ wykazywały zdecydowanie niższe wartości wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie zarówno po 7, jak i 28 dniach dojrzewania. Wartość równą 100 kPa przekroczyły po 7 dniach dojrzewania kompozyty K8-K10 o stosunku m_c/m_s wyższym od 1,25, natomiast po 28 dniach wszystkie poza najslabszym kompozytem K6 o $m_c/m_s = 0,75$ (rys. 24). Uzyskane wartości dla kompozytów K6-K10 po 7 dniach dojrzewania mieściły się w granicach 31,57-181,86 kPa.

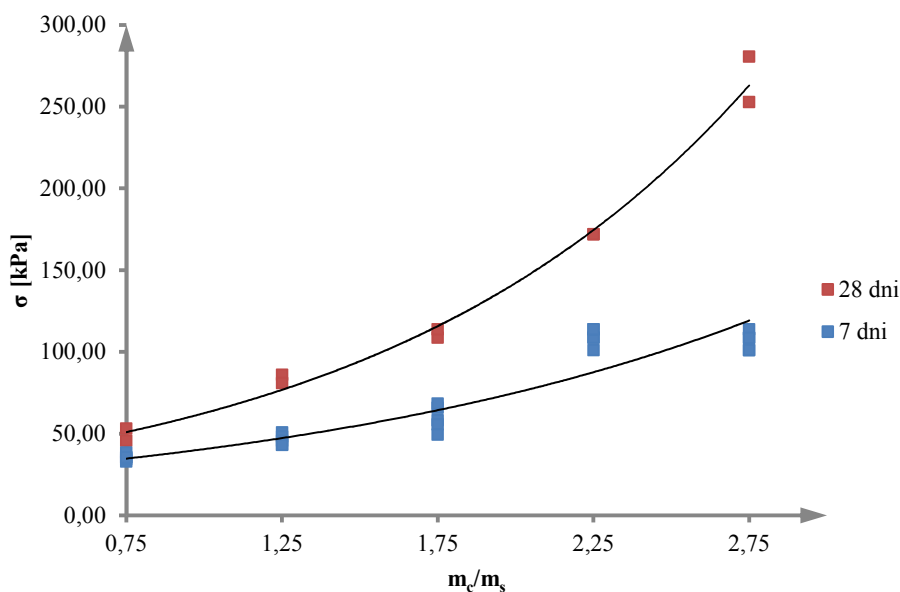
Wytrzymałość kompozytów K6-K10, w odróżnieniu od kompozytów K1-K5 o niższej zawartości substancji organicznej, wzrosła po 28 dniach bardzo znacząco w stosunku do wartości uzyskanych po 7 dojrzewania. Najwyższy wzrost o ponad 122% zaobserwowano w przypadku kompozytu K10 o $m_c/m_s = 2,75$. Pozostałe kompozyty K6-K9 zwiększyły swoją średnią wytrzymałość odpowiednio o około 82%, 59%, 82% i 94%.



Rys. 24. Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie próbek cylindrycznych kompozytu K6-K10 o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 40\%$ w zależności od stosunku masy dodawanego cementu do masy suchego gruntu m_c/m_s

Wartości wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie kompozytów K11-K15 o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 60\%$ po 7 i 28 dniach dojrzewania przedstawiono na rysunku 25. Średnie wartości wytrzymałości najsłabszego kompozytu K11 o $m_c/m_s = 0,75$ były po 7 dniach zbliżone do kompozytu K1, mimo znacznie niższego udziału cementu i wyższej zawartości substancji organicznej. W przypadku pozostałych kompozytów zmierzone wartości były zdecydowanie niższe niż w przypadku kompozytów K1-K5 o $I_{om} = 60\%$ i o tym samym stosunku m_c/m_s . Wartość średniej wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie powyżej 100 kPa osiągnęły po 7 dniach dojrzewania kompozyty K14 i K15 o stosunku m_c/m_s wyższym od 1,75, a po 28 dniach kompozyty K13, K14 i K15 o m_c/m_s wyższym od 1,25.

Kompozyty K11-K15 podobnie jak kompozyty K6-K10 charakteryzował zdecydowany wzrost wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie po 28 dniach w stosunku do tych po 7 dniach dojrzewania. Wytrzymałość kompozytu K15 wzrosła po 28 dniach o ponad 150%. Jest to najwyższy wzrost odnotowany spośród wszystkich kompozytów. Średnie wartości pozostałych kompozytów K11-K14 podwyższyły się odpowiednio o około 40%, 81%, 87% i 57%.

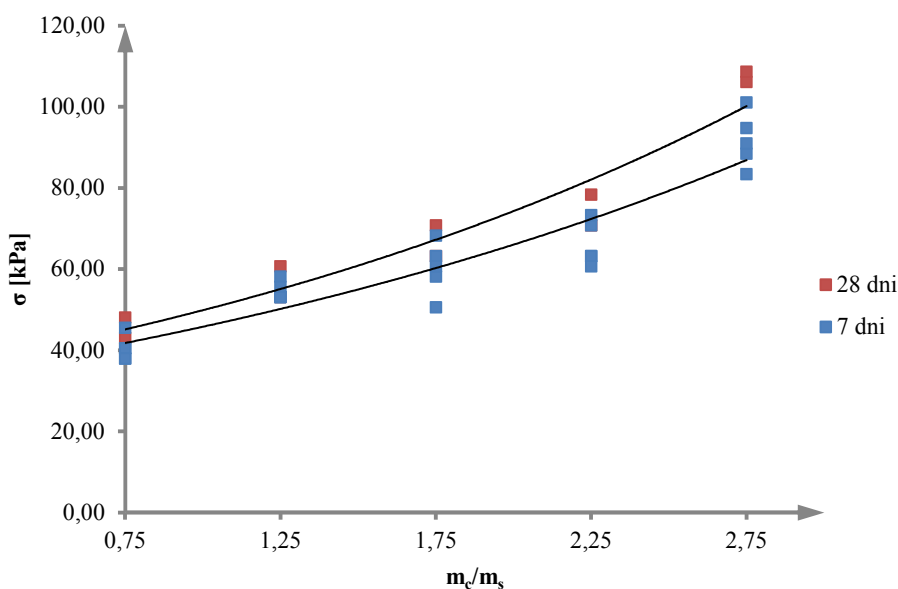


Rys. 25. Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie próbek cylindrycznych kompozytu K11-K15 o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 60\%$ w zależności od stosunku masy dodawanego cementu do masy suchego gruntu m_c/m_s

Kompozyty K16-K20 o najwyższej naturalnej zawartości substancji organicznej na tle innych kompozytów charakteryzowały się najniższymi wytrzymałościami na jednoosiowe ściskanie (rys. 26). Wyjątkiem były kompozyty K16 i K17 o stosunku $m_c/m_s = 0,75$ i 1,75. Wartości ich wytrzymałości na jedno-

siowe ścisnienie po 7 dniach dojrzewania były wyższe od kompozytów K11 i K12 o tym samym stosunku m_c/m_s , ale niższej zawartości substancji organicznej. Tylko kompozyt K20 o $m_c/m_s = 2,75$ uzyskał wytrzymałość na ścisnienie nieznacznie wyższą od 100 kPa. Zmierzone wartości wytrzymałości dla kompozytów K16-K20 po 7 dniach dojrzewania mieściły się w granicach 37,89-101,03 kPa.

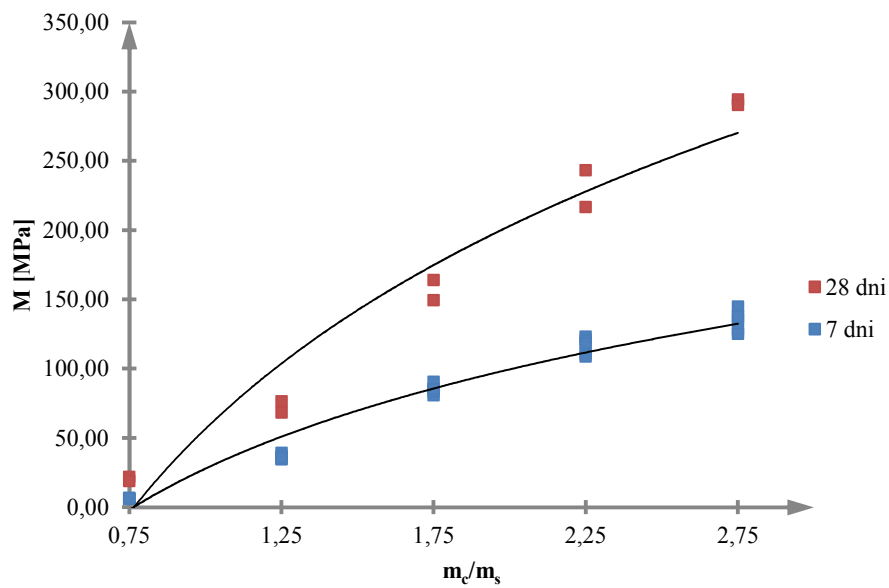
Wzrost średnich wytrzymałości kompozytów K16-K20 po 28 dniach dojrzewania w stosunku do wartości uzyskanych po 7 dojrzewania był najniższy spośród wszystkich badanych kompozytów. Wytrzymałość kompozytu K20 o $m_c/m_s = 2,75$ po 28 dniach dojrzewania wzrosła o ponad 17%. Pozostałe kompozyty K16-K19 zwiększyły swoją średnią wytrzymałość odpowiednio o około 13%, 4%, 11% i 13%.



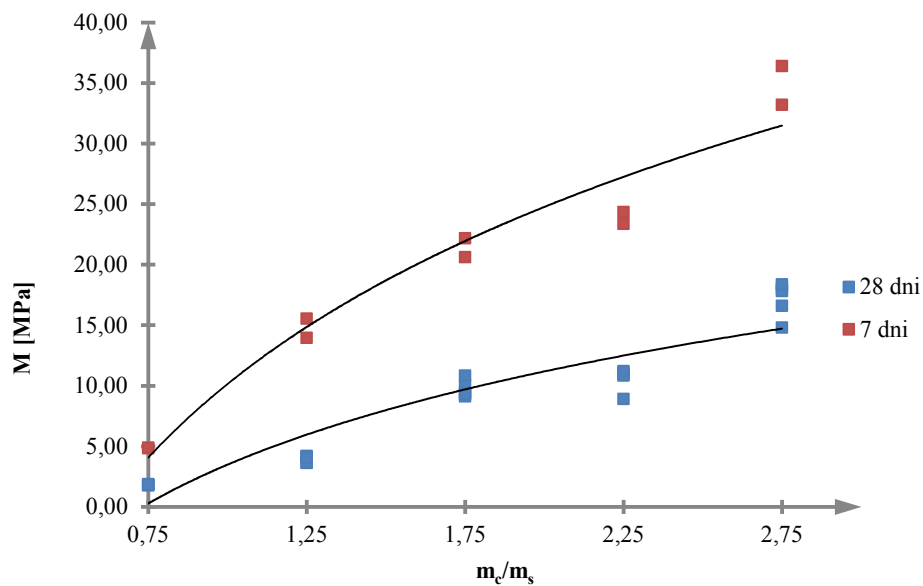
Rys. 26. Wytrzymałość na jednoosiowe ścisnienie próbek cylindrycznych kompozytu K16-K20 o naturalnej zawartości substancji organicznej w zależności od stosunku masy dodawanego cementu do masy suchego gruntu m_c/m_s

4.1.5.2. Moduł odkształcenia

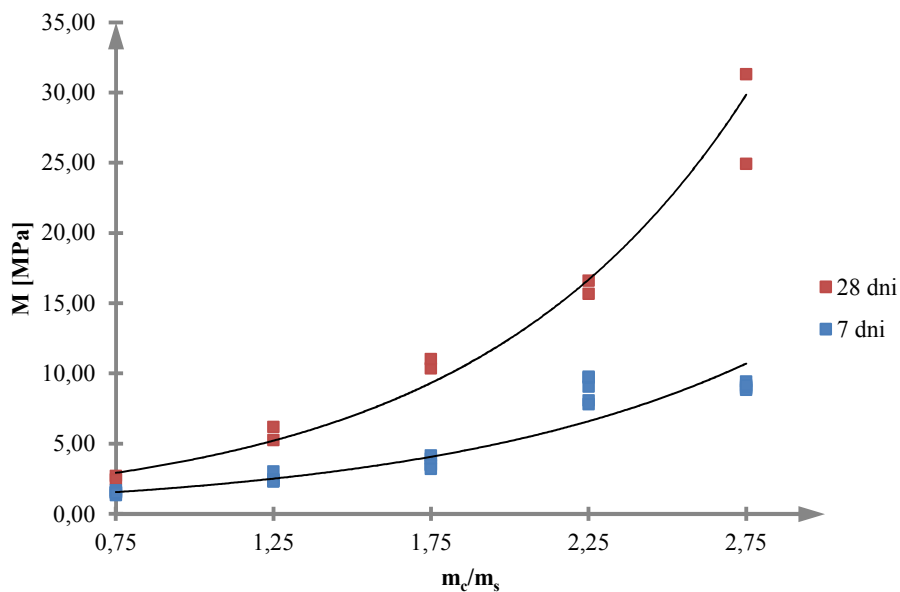
Na rysunkach 27-30 przedstawiono zestawienia określonych modułów odkształcenia. Jak pokazuje praktyka jest on równie ważny jak sama wytrzymałość na jednoosiowe ścisnienie. Zdarza się, że właśnie ten parametr decyduje o wyborze konkretnej receptury kompozytu.



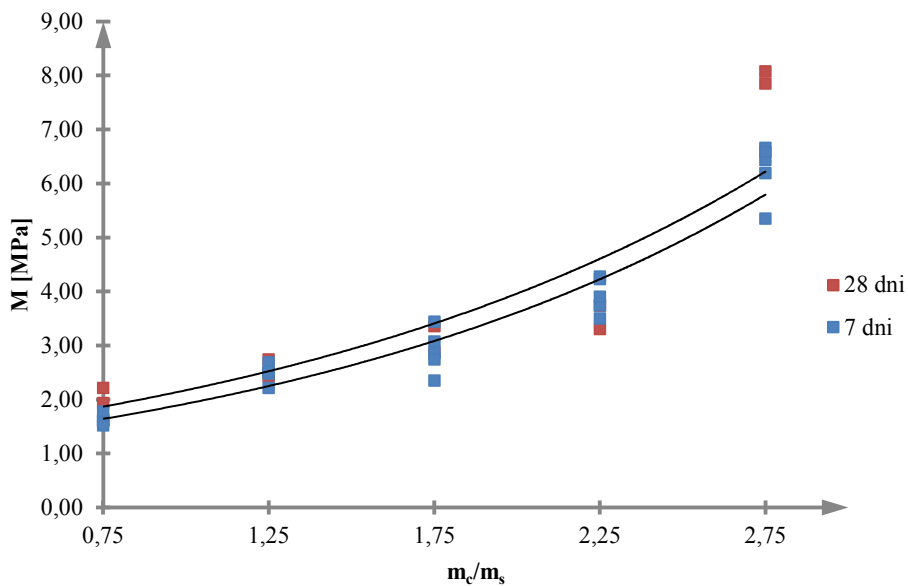
Rys. 27. Moduł odkształcenia próbek cylindrycznych kompozytu K1-K5 o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 20\%$ w zależności od stosunku masy dodawanego cementu do masy suchego gruntu m_c/m_s



Rys. 28. Moduł odkształcenia próbek cylindrycznych kompozytu K6-K10 o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 40\%$ w zależności od stosunku masy dodawanego cementu do masy suchego gruntu m_c/m_s



Rys. 29. Moduł odkształcenia próbek cylindrycznych kompozytu K11-K15 o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 60\%$ w zależności od stosunku masy dodawanego cementu do masy suchego gruntu m_c/m_s



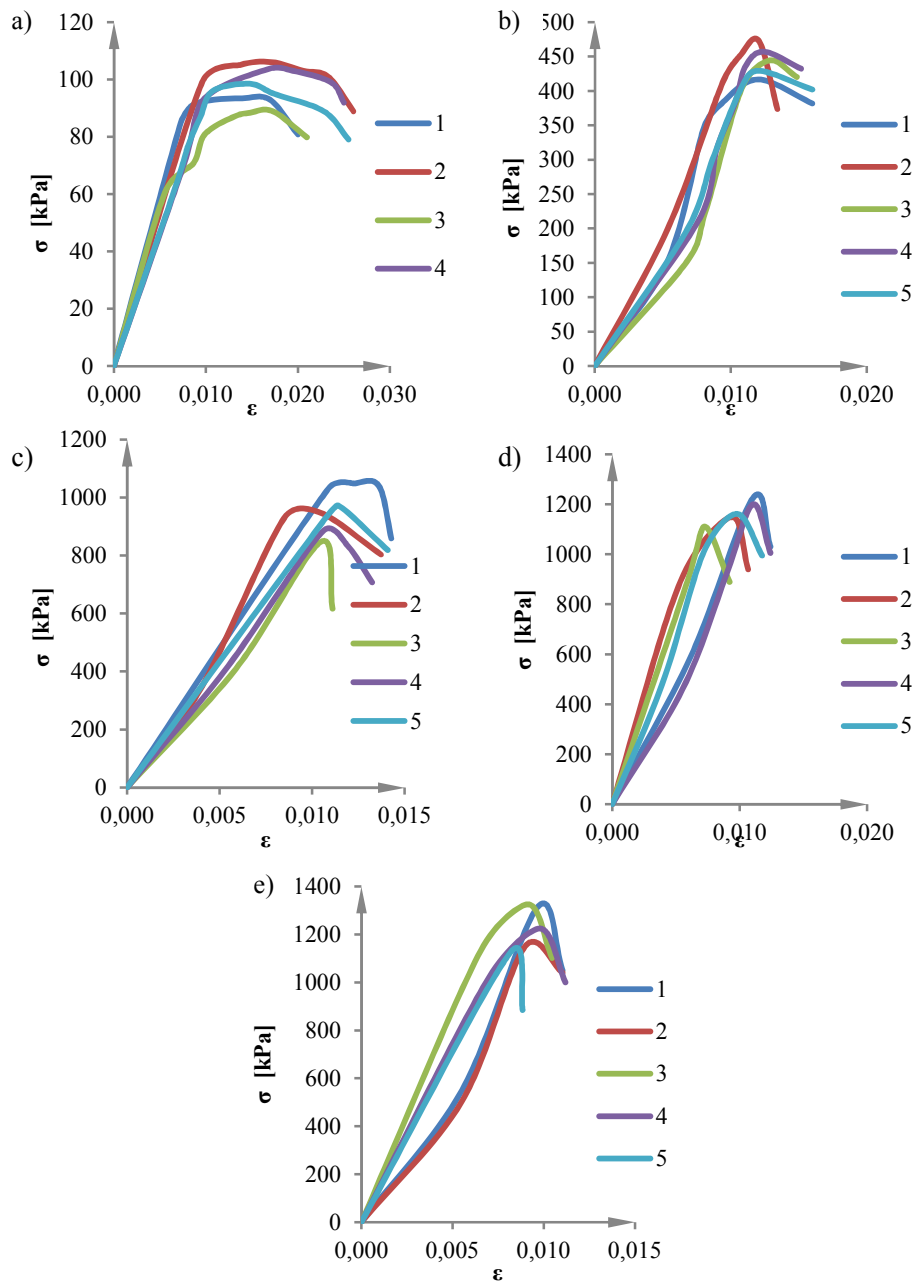
Rys. 30. Moduł odkształcenia próbek cylindrycznych kompozytu K16-K20 o naturalnej zawartości substancji organicznej $I_{om} = 83,64$ (84,40)% w zależności od stosunku masy dodawanego cementu do masy suchego gruntu m_c/m_s

Analizując rozkłady modułów odkształceń dla poszczególnych kompozytów, można zauważyć przewidywalną prawidłowość. Kompozyty o wyższej zawartości cementu (wyższym stosunku m_c/m_s) oraz o mniejszej zawartości substancji organicznej (wyższym udziale piasku kwarcowego) charakteryzują się proporcjonalnie wyższym modułem ściśliwości. Uzyskane wartości modułów odkształcenia dla kompozytów o najmniejszej zawartości substancji organicznej $I_{om} = 20\%$ w zależności od stosunku m_c/m_s mieściły się w granicach 5,91-144,92 MPa po 7 dniach i 18,92-294,38 MPa po 28 dniach dojrzewania. Z kolei wartości modułów dla kompozytów o naturalnej zawartości substancji organicznej w zależności od stosunku m_c/m_s wynosiły 1,52-6,65 MPa po 7 dniach i 1,93-8,07 MPa po 28 dniach dojrzewania.

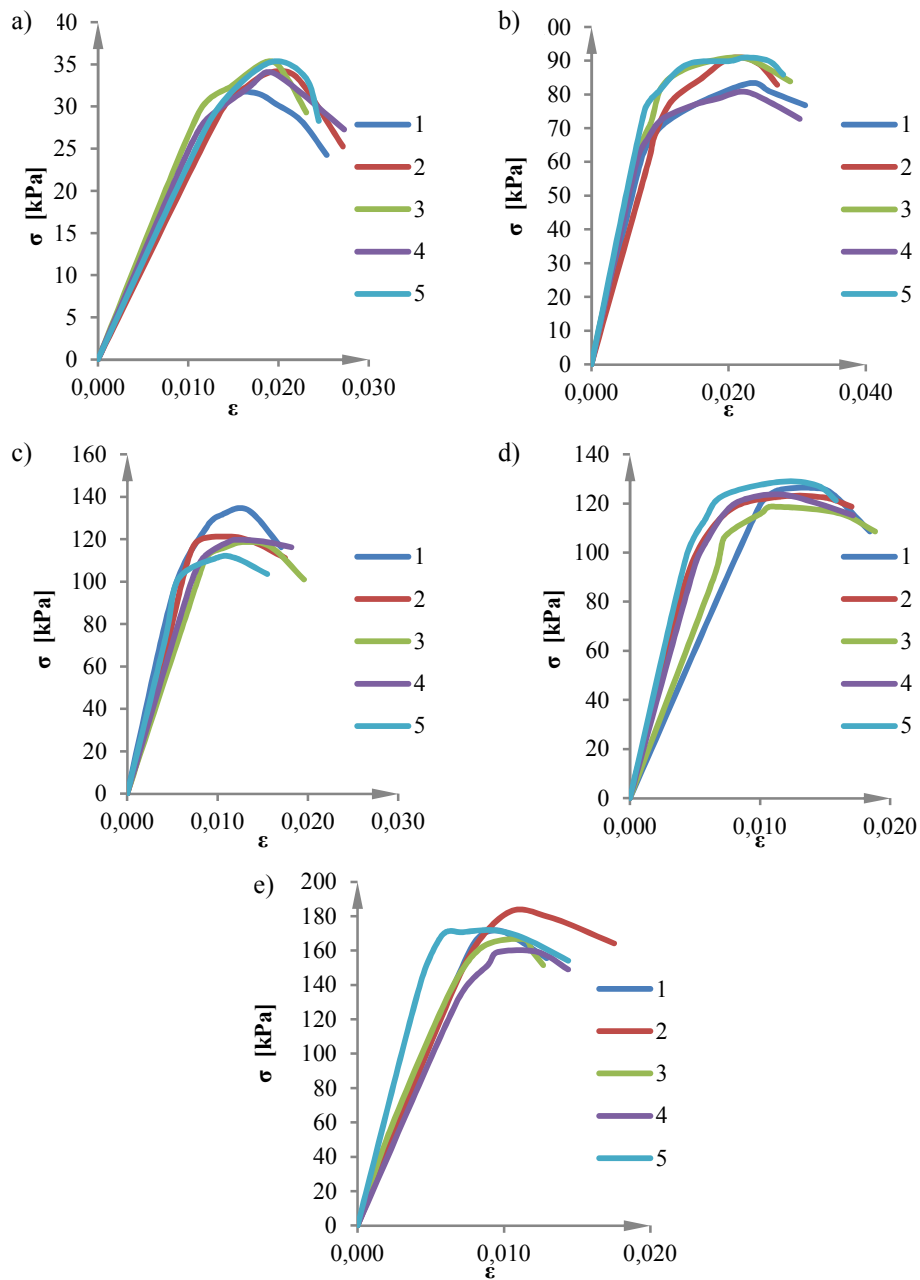
W przypadku kompozytów o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 20\%$, 40% i 60% zaobserwowano bardzo duży przyrost modułów odkształcenia po 28 dniach w stosunku do wartości uzyskanych po 7 dniach dojrzewania. Zaobserwowano, że nie należy sugerować się wartościami wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie w celu prognozowania wartości modułów odkształcenia. Dla kompozytu K5 o $I_{om} = 20\%$ i $m_c/m_s = 2,75$ moduł odkształcenia po 28 dniach zwiększył swoją wartość ponad dwukrotnie. Porównując te wyniki z wartościami wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie dla tego kompozytu można zauważyć, że wzrost wartości modułu odkształcenia jest kilkukrotnie wyższy od wzrostu wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie.

4.1.5.3. Wykresy zależności σ - ϵ

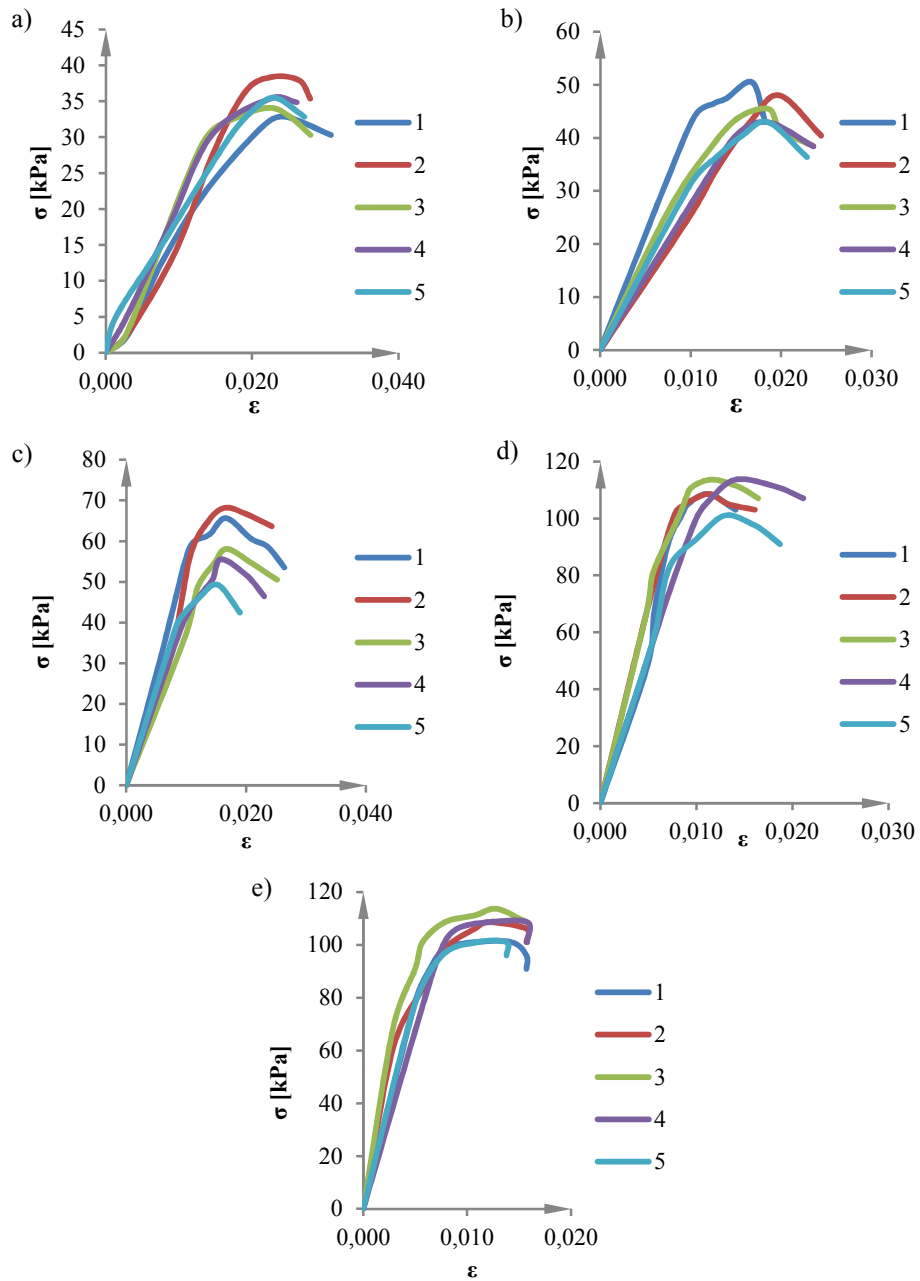
Grunt wzmocniany cementem – cementogrunt poddany działaniu obciążenia ulega odkształceniom, które rosną wraz ze wzrostem naprężeń. Cementogrunt, tak jak beton nie jest ciałem idealnie sprężystym. Jednak analiza wykresów zależności σ - ϵ dla badanych kompozytów wskazuje, że w odróżnieniu od betonu w początkowej fazie obciążania zależność naprężeń od odkształceń ma przebieg liniowy. Prawdopodobnie związane jest to z gąbczastą strukturą substancji organicznej będącej składnikiem kompozytu. Poniżej na rysunkach 31-34 przedstawiono wykresy zależności σ - ϵ po 7 dniach oraz na rysunkach 35-38 po 28 dniach dojrzewania.



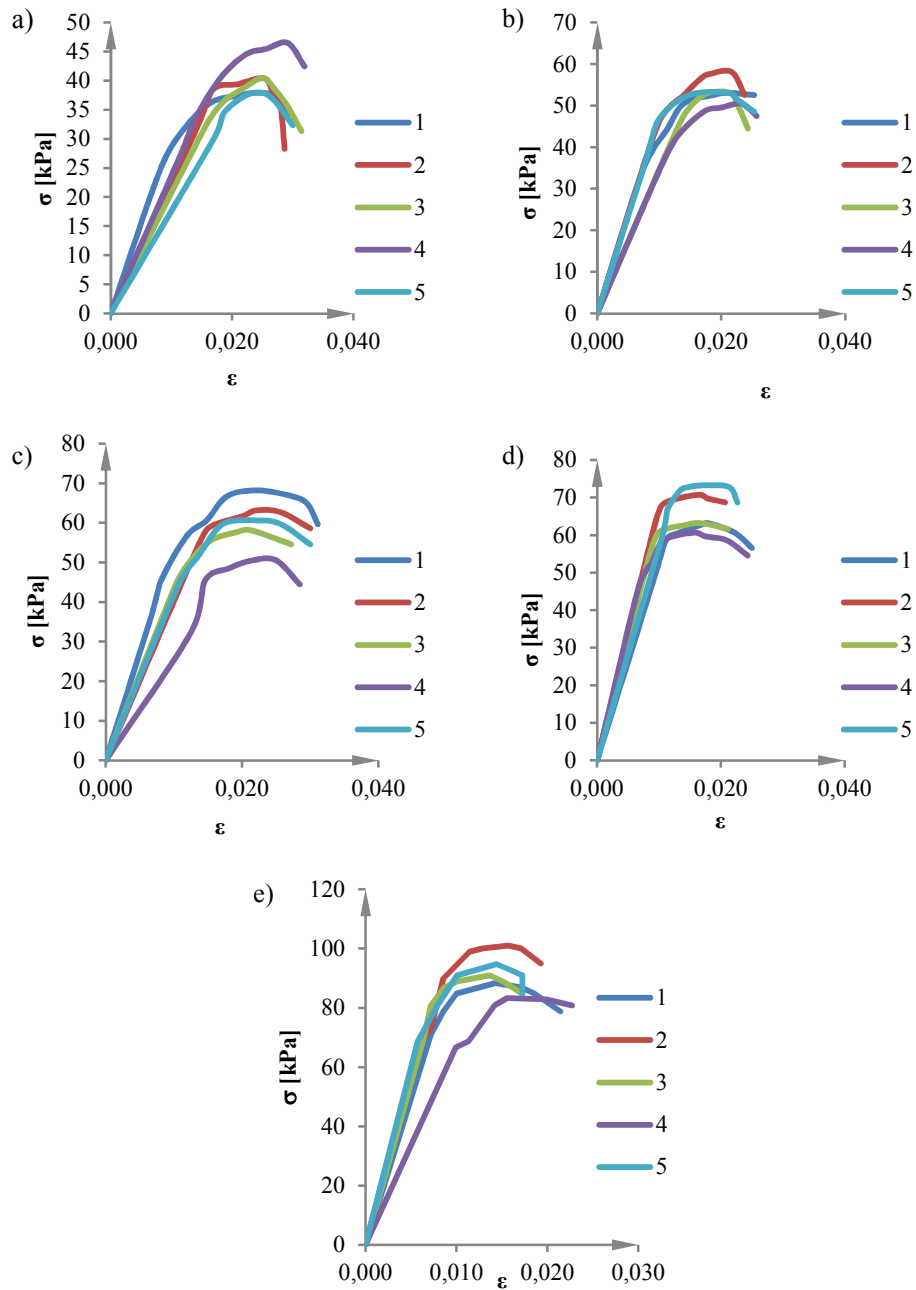
Rys. 31. Wykresy zależności naprężenia do odkształcenia względnego dla próbek cylindrycznych o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 20\%$ po 7 dniach dojrzewania: a) kompozyt K1, b) kompozyt K2, c) kompozyt K3, d) kompozyt K4, e) kompozyt K5



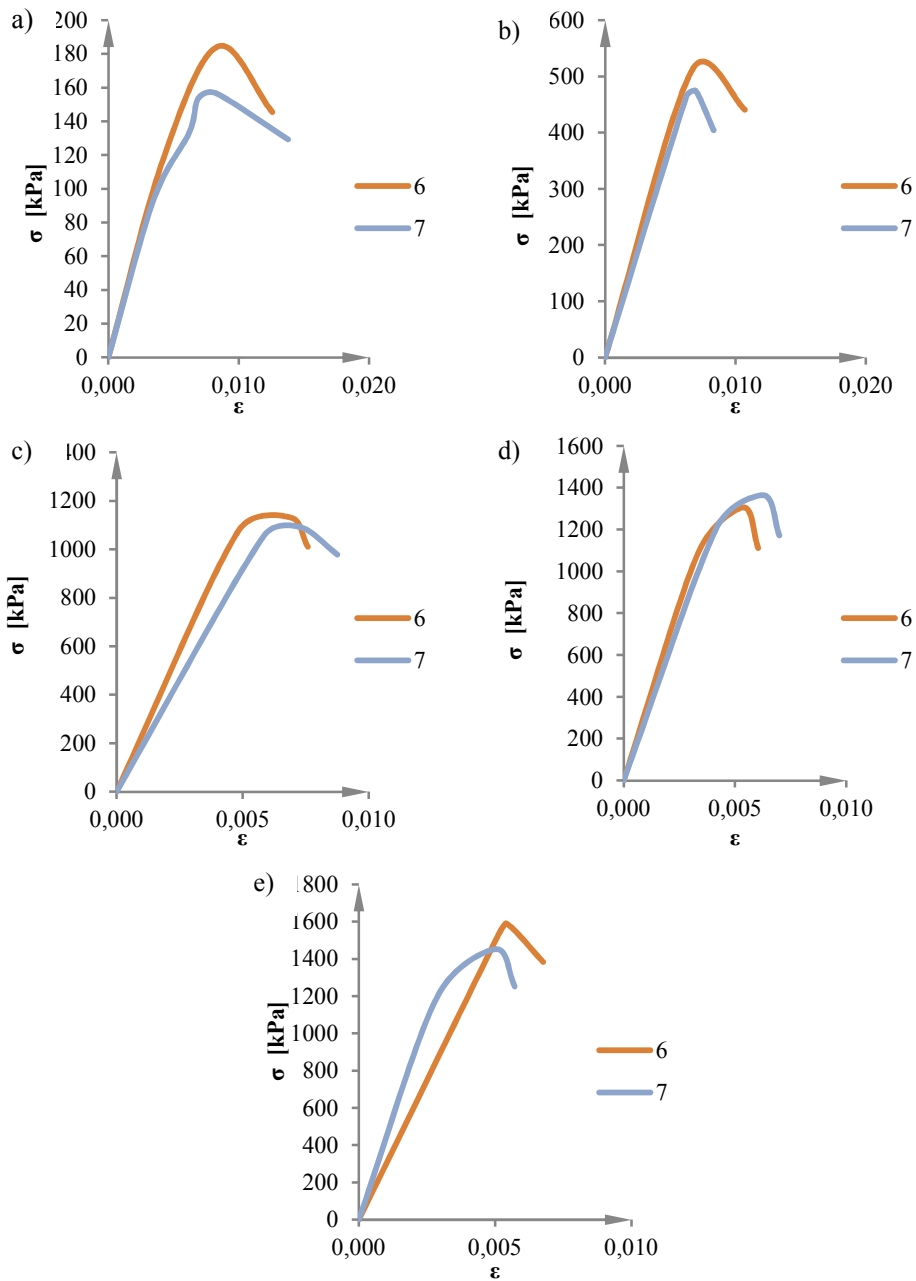
Rys. 32. Wykresy zależności naprężenia do odkształcenia względnego dla próbek cylindrycznych o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 40\%$ po 7 dniach dojrzewania: a) kompozyt K6, b) kompozyt K7, c) kompozyt K8, d) kompozyt K9, e) kompozyt K10



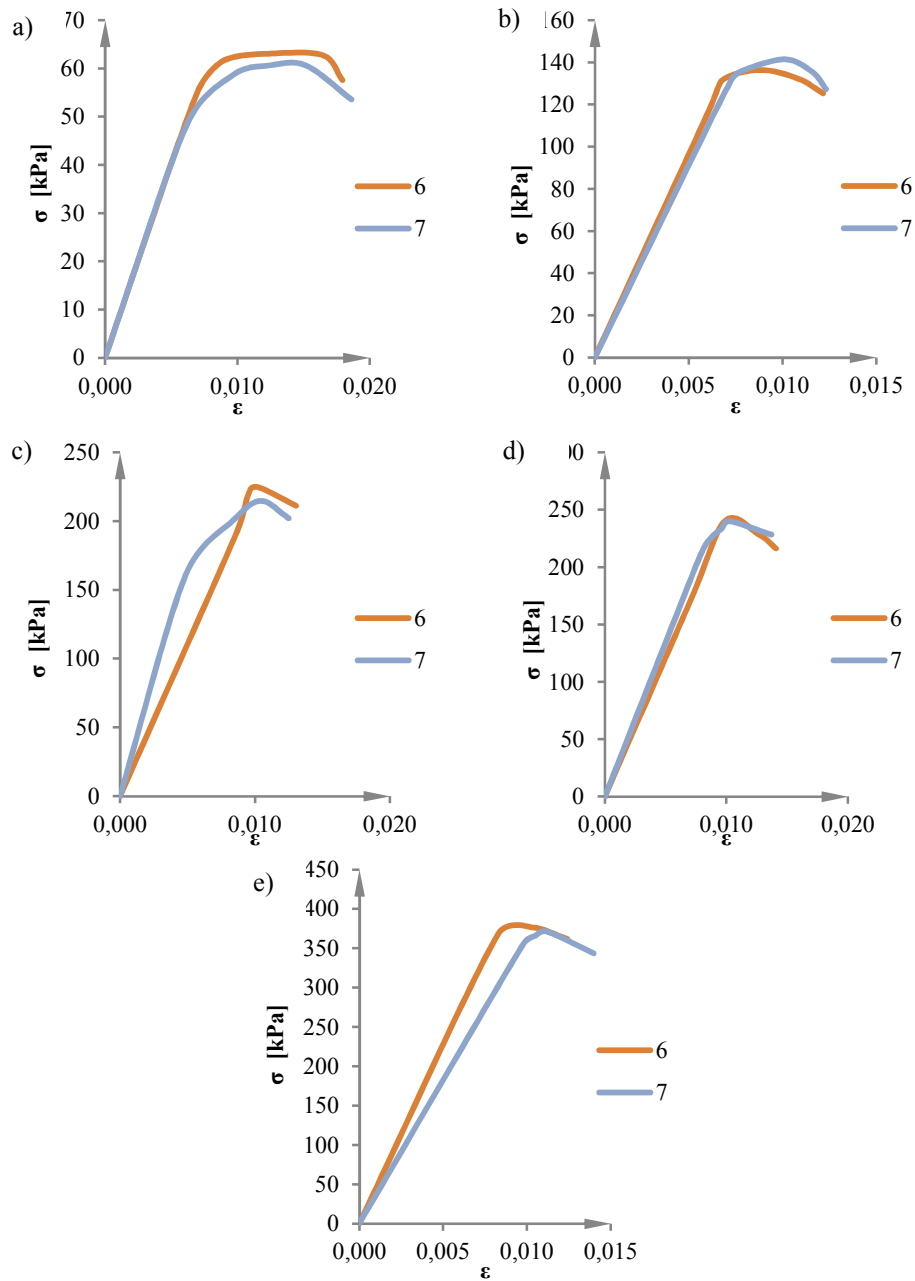
Rys. 33. Wykresy zależności naprężenia do odkształcenia względnego dla próbek cylindrycznych o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 60\%$ po 7 dniach dojrzewania: a) kompozyt K11, b) kompozyt K12, c) kompozyt K13, d) kompozyt K14, e) kompozyt K15



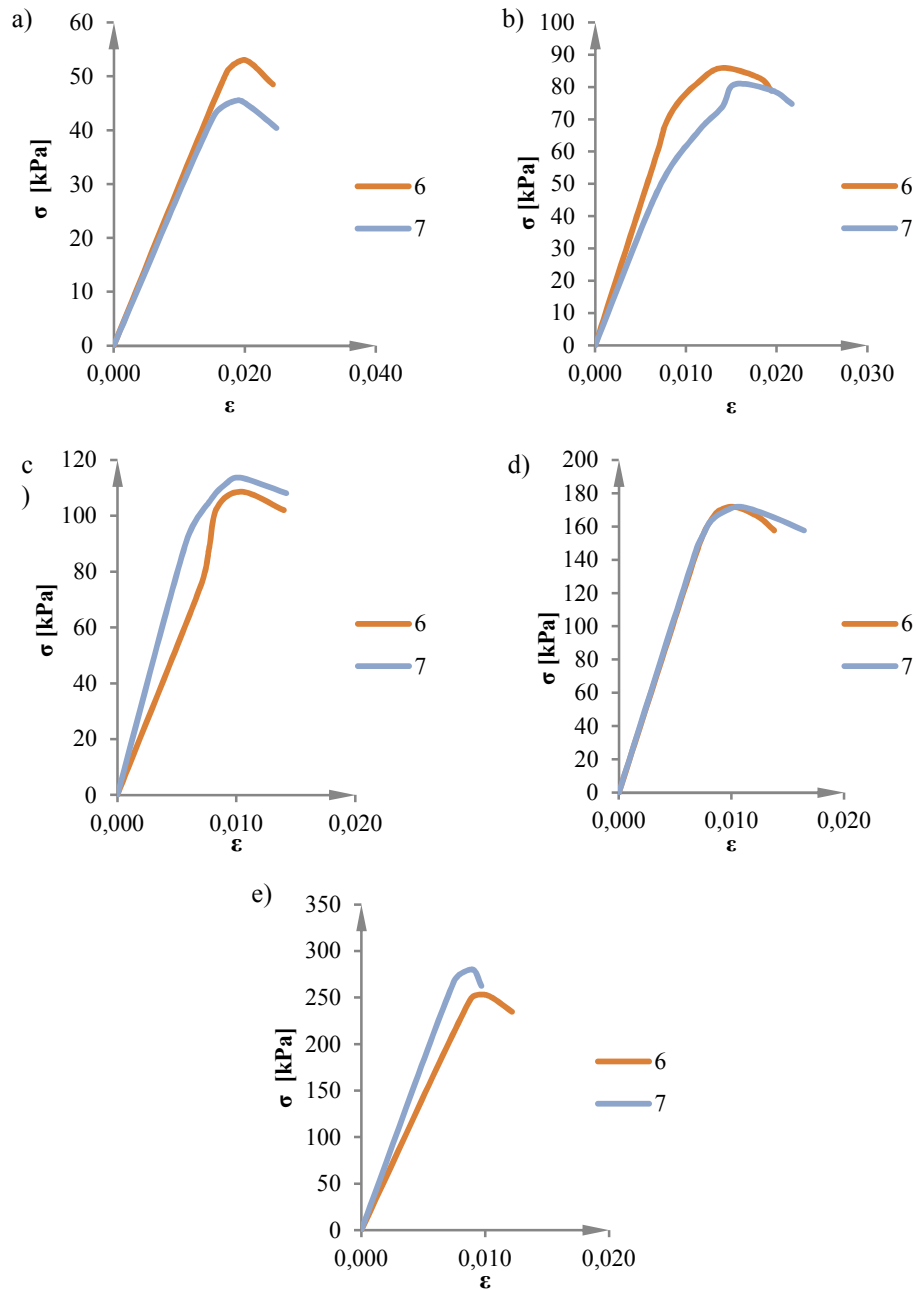
Rys. 34. Wykresy zależności naprężenia do odkształcenia względnego dla próbek cylindrycznych o naturalnej zawartości substancji organicznej po 7 dniach dojrzewania: a) kompozyt K16, b) kompozyt K17, c) kompozyt K18, d) kompozyt K19, e) kompozyt K20



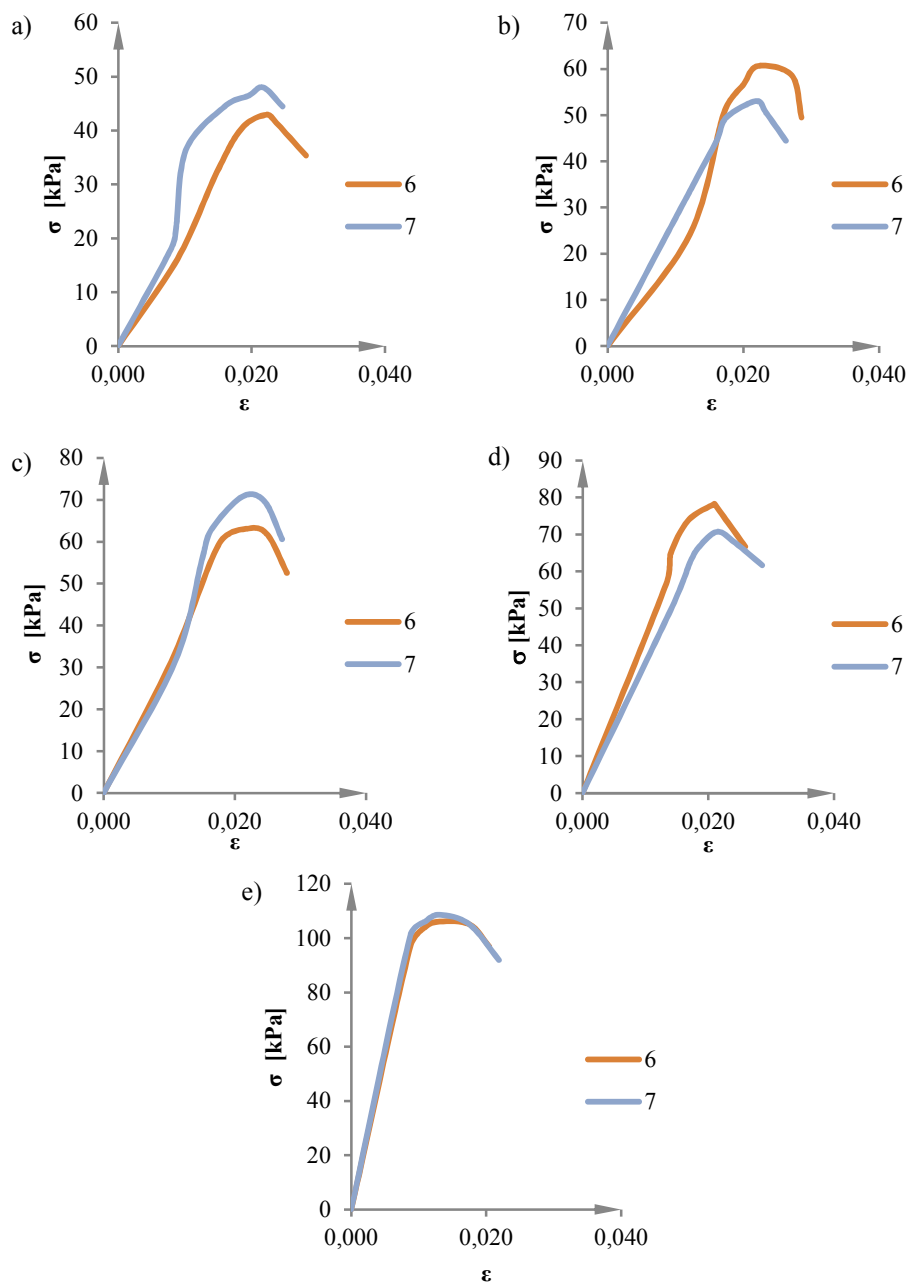
Rys. 35. Wykresy zależności naprężenia do odkształcenia względnego dla próbek cylindrycznych o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 20\%$ po 28 dniach dojrzewania: a) kompozyt K1, b) kompozyt K2, c) kompozyt K3, d) kompozyt K4, e) kompozyt K5



Rys. 36. Wykresy zależności naprężenia do odkształcenia względnego dla próbek cylindrycznych o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 40\%$ po 28 dniach dojrzewania: a) kompozyt K6, b) kompozyt K7, c) kompozyt K8, d) kompozyt K9, e) kompozyt K10



Rys. 37. Wykresy zależności naprężenia do odkształcenia względnego dla próbek cylindrycznych o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 60\%$ po 28 dniach dojrzewania: a) kompozyt K11, b) kompozyt K12, c) kompozyt K13, d) kompozyt K14, e) kompozyt K15



Rys. 38. Wykresy zależności naprężenia do odkształcenia względnego dla próbek cylindrycznych o naturalnej zawartości substancji organicznej po 28 dniach dojrzewania: a) kompozyt K16, b) kompozyt K17, c) kompozyt K18, d) kompozyt K19, e) kompozyt K20

Dla wszystkich kompozytów można zauważyć pewne cechy wspólne. Analizując wykresy zależności σ - ε widać liniowy wzrost odkształceń kompozytu do pewnej wartości granicznej naprężenia, która zależy od udziału cementu, zawartości substancji organicznej oraz czasu dojrzewania. Po jej przekroczeniu wykres σ - ε ulega zakrzywieniu, wykazując wyraźną nieliniowość, aż do momentu zniszczenia próbki.

W przypadku kompozytów K1-K5 o najniższej zawartości substancji organicznej niszczone po 7 dniach dojrzewania przebieg odkształcenia wygląda inaczej niż w przypadku pozostałych kompozytów. Po osiągnięciu wartości około połowy naprężeń niszczących liniowy wykres odkształceń ulega zdecydowanemu zakrzywieniu. Powyżej tej granicy odkształcenia mają nadal liniowy charakter natomiast ze zwiększonym przyrostem. Związane jest to prawdopodobnie z zagęszczaniem się próbki podczas badania.

Liniowe odkształcenia miały najkrótszy przebieg w przypadku kompozytów o najwyższej zawartości substancji organicznej. Kompozyty K16-K20, a w szczególności te o najniższym stosunku m_c/m_s , charakteryzowały się dużymi odkształceniami plastycznymi. Już po osiągnięciu około 50-60% wartości naprężeń niszczących następuje gwałtowne zakrzywienie wykresu, a przed samym zniszczeniem pojawia się znaczny wzrost odkształceń przy stałym obciążeniu.

Kompozyt K5 o najwyższym stosunku $m_c/m_s = 2,75$ już po 7 dniach dojrzewania zachowuje się podczas badań niszczących w sposób zbliżony do materiałów kruchych. Wykres σ - ε ma nieznaczny zasięg odkształceń plastycznych, po których następuje nagle zniszczenie próbki. Po 28 dniach dojrzewania już zdecydowanie więcej kompozytów wykazuje takie właściwości.

W przypadku wszystkich kompozytów po 28 dniach dojrzewania, oprócz wyższej wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie i mniejszych odkształceń do momentu zniszczenia zdecydowanie bardziej zaznacza się liniowy przyrost odkształceń, nawet w przypadku najsłabszych kompozytów.

4.1.5. Analiza statystyczna wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie

4.1.5.1. Wprowadzenie

Analizie statystycznej poddane zostały wyniki badań wytrzymałościowych na jednoosiowe ściskanie próbek cylindrycznych po 7 dniach dojrzewania. Analizy wyników po 28 dniach dojrzewania ze względu na małą populację prób mają charakter wyłącznie wskaźnikowy. Ograniczono się do analizy wyników badań wytrzymałościowych ze względu na to, że badania te są najważniejszą częścią pracy i punktem odniesienia do innych badań.

Poszczególne wyniki poddano analizie statystycznej z wykorzystaniem programów Microsoft Excel pakietu Microsoft Office wersja 2010 oraz programu STATISTICA firmy StatSoft. Analiza statystyczna obejmowała: wyliczenie średnich (\bar{x}), odchyłeń standardowych (SD), współczynników zmienności (V_s), współczynników korelacji (r), współczynników determinacji (r^2). Metodę analizy statystycznej oparto na publikacjach: [3, 30, 35, 41].

4.1.5.2. Statystyczna analiza wyników

Szczegółowej analizie poddano wszystkie wykonane mieszanki próbek cylindrycznych. Wyniki przeprowadzonej analizy dla próbek po 7 dniach przedstawiono w tabelach 17-20 odpowiednio dla 20, 40, 60% oraz naturalnej zawartości substancji organicznej.

Tabela 17. Naprężenia niszczące kompozytów K1-K5 o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 20\%$ po 7 dniach dojrzewania w zależności od stosunku masy dodawanego cementu do masy suchego gruntu m_c/m_s

Kompozyty	K1	K2	K3	K4	K5
m_c/m_s	0,75	1,25	1,75	2,25	2,75
Wytrzymałość na ściskanie σ [kPa]	93,45	416,75	1048,19	1225,00	1313,40
	106,08	472,32	947,16	1149,22	1149,22
	88,40	444,54	846,13	1111,34	1326,03
	103,56	457,16	884,02	1199,74	1225,00
	98,50	429,38	972,42	1161,85	1123,97
X	98,00	444,03	939,58	1169,43	1227,52
SD	6,47	19,66	70,36	39,62	82,39
V_s [%]	6,60	4,43	7,49	3,39	6,71

Analiza średnich wartości naprężeń niszczących kompozytów K1-K5 o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 20\%$ zamieszczonych w tabeli 17 wskazuje, że wraz ze wzrostem zawartości cementu wytrzymałość kompozytów na jednoosiowe ściskanie rośnie. Szczególnie duży wzrost widać w przypadku kompozytów K1-K3 o stosunku $m_c/m_s = 0,75-1,75$. Kompozyt K2 ma blisko pięciokrotnie większą wytrzymałość od kompozytu K1, a kompozyt K3 ponad dwukrotnie większą od kompozytu K2. W przypadku kompozytów K4 i K5 o stosunku $m_c/m_s = 2,25$ i $2,75$ wzrost wytrzymałości nie jest tak widoczny i wynosi około 5%.

Wartości współczynnika zmienności dla próbek kompozytów K1-K5 wahają się od 3,39 do 6,71% co świadczy o braku istotnego zróżnicowania.

Tabela 18. Naprężenia niszczące kompozytów K6-K10 o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 40\%$ po 7 dniach dojrzewania w zależności od stosunku masy dodawanego cementu do masy suchego gruntu m_c/m_s

Kompozyty	K6	K7	K8	K9	K10
m_c/m_s	0,75	1,25	1,75	2,25	2,75
Wytrzymałość na ściskanie σ [kPa]	31,57	83,35	133,87	126,29	171,75
	34,10	90,93	121,24	122,50	181,86
	35,36	90,93	118,71	118,71	166,70
	34,10	80,82	118,71	123,76	159,12
	35,36	90,93	111,13	128,81	171,75
X	34,10	87,39	120,73	124,01	170,24
SD	1,38	4,41	7,39	3,43	7,43
V_s [%]	4,06	5,04	6,12	2,76	4,36

W przypadku kompozytów o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 40\%$, a w szczególności K6-K8 o stosunku $m_c/m_s = 0,75-1,75$, widoczny jest znaczny wzrost wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie. Kompozyt K7 ma blisko trzykrotnie wyższą wytrzymałość od kompozytu K6, a kompozyt K8 o około 40% wyższą od kompozytu K7. Z kolei między kompozytem K8, a K9 o stosunku $m_c/m_s = 1,75$ i $2,25$ wzrost wytrzymałości jest nieznaczny i wynosi niespełna 3%. Dalszy wzrost wytrzymałości jest widoczny dla kompozytów K9 i K10 o stosunku $m_c/m_s = 2,25$ i $2,75$. Kompozyt K9 ma o około 40% wyższą wytrzymałość od kompozytu K10.

Wartości współczynnika zmienności dla próbek kompozytów K6-K10 wahają się od 2,76 do 5,04%, co świadczy o braku istotnego zróżnicowania.

Rozkład średnich wartości naprężeń niszczących kompozytów K11-K15 o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 60\%$ przedstawionych w tabeli 19 odbiega od kompozytów o mniejszej zawartości tej substancji. Wzrost wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie dla kompozytów K11-K13 o stosunku $m_c/m_s = 0,75-1,75$ nie jest już tak gwałtowny. Kompozyt K12 ma o 30% wyższą wytrzymałość od kompozytu K11, tak samo jak kompozyt K13 od K12. Największy wzrost wytrzymałości występuje między kompozytem K13 a K14 o stosunku $m_c/m_s = 1,75$ i $2,25$ i wynosi ponad 80%. Średnie wytrzymałości kompozytów K14 i K15 o stosunku $m_c/m_s = 2,25$ i $2,75$ są do siebie zbliżone. Co ciekawe kompozyt K15 o większej zawartości cementu jest nieznacznie słabszy od kompozytu K14.

Tabela 19. Naprężenia niszczące kompozytów K11-K15 o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 60\%$ po 7 dniach dojrzewania w zależności od stosunku masy dodawanego cementu do masy suchego gruntu m_c/m_s

Kompozyty	K11	K12	K13	K14	K15
m_c/m_s	0,75	1,25	1,75	2,25	2,75
Wytrzymałość na ściskanie σ [kPa]	32,83	50,56	65,67	108,61	101,03
	38,39	47,99	68,20	108,61	108,61
	34,10	45,46	58,09	113,66	113,66
	35,36	42,94	55,57	113,66	108,31
	35,36	42,94	49,25	101,03	101,03
X	35,21	45,98	59,36	109,11	106,53
SD	1,85	2,96	6,87	4,63	4,88
V_s [%]	5,25	6,44	11,58	4,24	4,58

Wartości współczynnika zmienności dla próbek kompozytów K11-K15 wahają się od 5,25 do 11,58%, co świadczy o braku istotnego zróżnicowania. Tylko w przypadku kompozytu K13 wartość współczynnika zmienności przekroczyła 10%.

Tabela 20. Naprężenia niszczące kompozytów K16-K20 o naturalnej zawartości substancji organicznej po 7 dniach dojrzewania w zależności od stosunku masy dodawanego cementu do masy suchego gruntu m_c/m_s

Kompozyt	K16	K17	K18	K19	K20
m_c/m_s	0,75	1,25	1,75	2,25	2,75
Wytrzymałość na ściskanie σ [kPa]	37,89	53,04	68,20	63,14	88,40
	40,41	58,09	63,14	70,72	101,03
	40,41	53,04	58,09	63,14	90,93
	45,46	55,52	50,52	60,62	83,35
	37,89	53,04	60,62	73,25	94,72
X	40,41	54,55	60,11	66,17	91,69
SD	2,76	2,02	5,85	4,90	5,96
V_s [%]	6,84	3,70	9,73	7,40	6,50

Rozkład wytrzymałości kompozytów K16-K20 o naturalnej zawartości substancji organicznej przedstawiony jest w tabeli 20. Kompozyt K17 o stosunku $m_c/m_s = 1,25$ ma o około 35% wyższą wytrzymałość od kompozytu K16 o $m_c/m_s = 0,75$. W przypadku kompozytów K17-K19 o stosunku $m_c/m_s = 1,25$ - $2,25$ wzrost wytrzymałości jest niewielki, ale proporcjonalny i wynosi 10% dla poszczególnych mieszanek. Największy wzrost wytrzymałości występuje w przypadku kompozytów K19 i K20. Kompozyt K20 o $m_c/m_s = 2,75$ jest o blisko 40% mocniejszy od kompozytu K19.

Wartości współczynnika zmienności dla próbek kompozytów K16-K20 wahają się od 3,70 do 9,73%, co świadczy o braku istotnego zróżnicowania.

Szczegółową analizę statystyczną przeprowadzono również dla próbek po 28 dniach dojrzewania. Jej wyniki przedstawiono w tabelach 21-24 i odpowiednio dla 20, 40, 60% oraz naturalnej zawartości substancji organicznej.

Tabela 21. Naprężenia niszczące kompozytów K1-K5 o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 20\%$ po 28 dniach dojrzewania w zależności od stosunku masy dodatkowego cementu do masy suchego gruntu m_c/m_s

Kompozyt	K1	K2	K3	K4	K5
m_c/m_s	0,75	1,25	1,75	2,25	2,75
Wytrzymałość na ściskanie σ [kPa]	184,38	512,73	1131,54	1305,82	1591,23
	156,60	474,84	1091,13	1363,91	1452,32
X	170,49	493,79	1111,34	1334,87	1521,78
SD	13,89	18,95	20,20	29,05	69,46
V_s [%]	8,15	3,84	1,82	2,18	4,56

W przypadku kompozytów K1-K5 o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 20\%$ po 28 dniach dojrzewania wzrost średnich wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie jest największy tak jak w przypadku próbek po 7 dniach dojrzewania. Wyniki analizy przedstawiono w tabeli 21. Kompozyt K2 o $m_c/m_s = 1,25$ jest blisko trzykrotnie mocniejszy od kompozytu K1 o $m_c/m_s = 0,75$, a kompozyt K3 o $m_c/m_s = 1,75$ ponad dwukrotnie mocniejszy od kompozytu K2. Wzrost wytrzymałości dla kompozytów K3-K5 o $m_c/m_s = 1,75$ - $2,75$ jest już znacznie mniejszy i wynosi odpowiednio około 20 i 14%.

Wartości współczynnika zmienności dla próbek kompozytów K1-K5 wahają się od 1,82 do 8,15%, co świadczy o braku istotnego zróżnicowania.

Tabela 22. Naprężenia niszczące kompozytów K6-K10 o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 40\%$ po 28 dojrzewania w zależności od stosunku masy dodawanego cementu do masy suchego gruntu m_c/m_s

Kompozyty	K6	K7	K8	K9	K10
m_c/m_s	0,75	1,25	1,75	2,25	2,75
Wytrzymałość na ściskanie σ [kPa]	63,14	136,39	224,79	239,95	376,34
	60,62	141,44	214,69	239,95	371,29
X	61,88	138,92	219,74	239,95	373,82
SD	1,26	2,53	5,05	0,00	2,52
V_s [%]	2,04	1,82	2,30	0,00	0,67

Wytrzymałości kompozytów K6-10 na jednoosiowe ściskanie o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 40\%$ przedstawiono w tabeli 22. Znaczny wzrost średnich wartości wytrzymałości można zauważyć w przypadku kompozytów K6-K8 o $m_c/m_s = 0,75$ do 1,75. Kompozyt K7 jest ponad dwukrotnie mocniejszy od kompozytu K6, a kompozyt K8 jest mocniejszy o około 60% od kompozytu K7. Kompozyt K8 o $m_c/m_s = 1,75$ ma nieznacznie wyższą wytrzymałość od kompozytu K9 o $m_c/m_s = 2,25$. Wzrost ten wynosi niespełna 10%. Kompozyt K10 o $m_c/m_s = 2,75$ charakteryzuje się o 50% wyższą średnią wytrzymałością od kompozytu K9.

Wartości współczynnika zmienności dla próbek kompozytów K6-K10 wahają się od 0 do 2,30%, co świadczy o braku istotnego zróżnicowania.

Tabela 23. Naprężenia niszczące kompozytów K11-K15 o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 60\%$ po 28 dojrzewania w zależności od stosunku masy dodawanego cementu do masy suchego gruntu m_c/m_s

Kompozyty	K11	K12	K13	K14	K15
m_c/m_s	0,75	1,25	1,75	2,25	2,75
Wytrzymałość na ściskanie σ [kPa]	53,04	85,88	108,61	171,75	252,58
	45,46	80,82	113,66	171,75	280,36
X	49,25	83,35	111,14	171,75	266,47
SD	3,79	2,53	2,53	0,00	13,89
V_s [%]	7,70	3,04	2,28	0,00	5,21

Rozkład średnich wartości wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie kompozytów K11-K15 o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 60\%$ przedstawiono w tabeli 23. Okazuje się, że największy wzrost wytrzymałości występuje dla kompozytu K12 o $m_c/m_s = 1,25$. Kompozyt ten jest o około 70% mocniejszy od kompozytu K11 o stosunku $m_c/m_s = 0,75$. Kompozyt K13 o $m_c/m_s = 1,75$ jest z kolei już tylko o 30% mocniejszy od kompozytu K12. Bardziej widoczny wzrost średnich wytrzymałości zaobserwowano dla kompozytów K14 i K15 o $m_c/m_s = 2,25$ i $2,75$ o około 50% dla każdej z mieszanek.

Wartości współczynnika zmienności dla próbek kompozytów K11-K15 wahają się od 0 do 7,70%, co świadczy o braku istotnego zróżnicowania.

Tabela 24. Naprężenia niszczące kompozytów K16-K20 o naturalnej zawartości substancji organicznej po 28 dniach dojrzewania w zależności od stosunku masy dodawanego cementu do masy suchego gruntu m_c/m_s

Kompozyty	K16	K17	K18	K19	K20
m_c/m_s	0,75	1,25	1,75	2,25	2,75
Wytrzymałość na ściskanie σ [kPa]	42,94	60,62	63,14	78,30	106,08
	47,99	53,04	70,72	70,72	108,61
X	45,47	56,83	66,93	74,51	107,35
SD	2,53	3,79	3,79	3,79	1,27
V, [%]	5,56	6,67	5,66	5,09	1,18

Średnie wytrzymałości kompozytów K16-K20 o naturalnej zawartości substancji organicznej przedstawiono w tabeli 24. Analiza rozkładu pokazuje wzrost wytrzymałości wraz ze wzrostem zawartości cementu, przy czym dla kompozytów K16-K19 o $m_c/m_s = 0,75-2,25$ wzrost ten jest coraz niższy i wynosi odpowiednio około 25%, 18% i 11%. Największy wzrost zanotowano dla kompozytu K20 o $m_c/m_s = 2,75$. Jest o ponad 40% mocniejszy od kompozytu K19.

Wartości współczynnika zmienności dla próbek kompozytów K16-K20 wahają się od 1,18 do 6,67%, co świadczy o braku istotnego zróżnicowania.

4.1.5.3. Analiza współzależności

Do zmierzenia siły związku prostoliniowego między mierzalnymi cechami służy współczynnik korelacji liniowej Pearsona [r]. Jest on unormowanym miernikiem natężenia i kierunku współzależności liniowej dwóch zmiennych X i Y, wyznaczonym przez standaryzację kowariancji według wzoru (2):

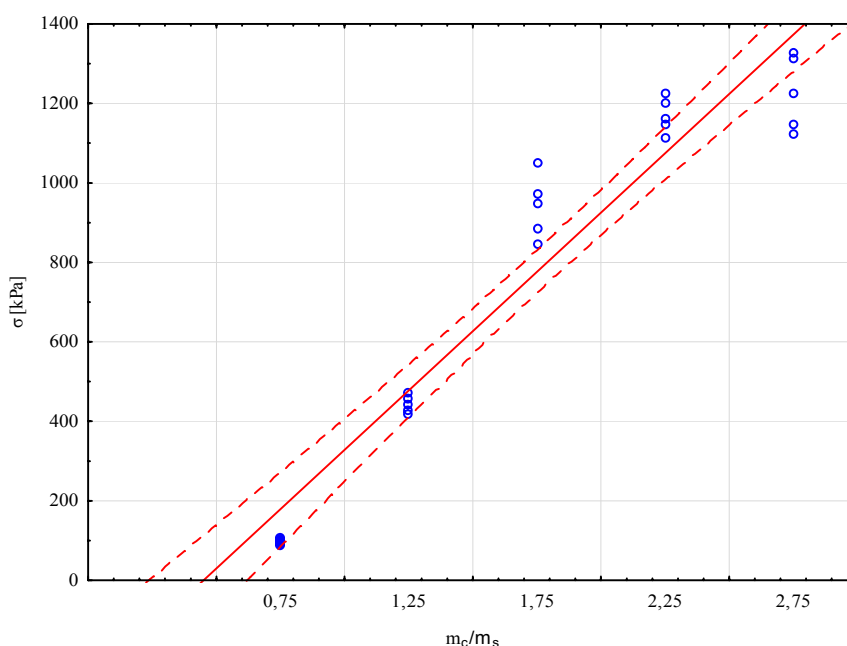
$$r_{xy} = r_{yx} = \frac{\text{cov}(x,y)}{s(x)s(y)}, \quad (2)$$

gdzie:

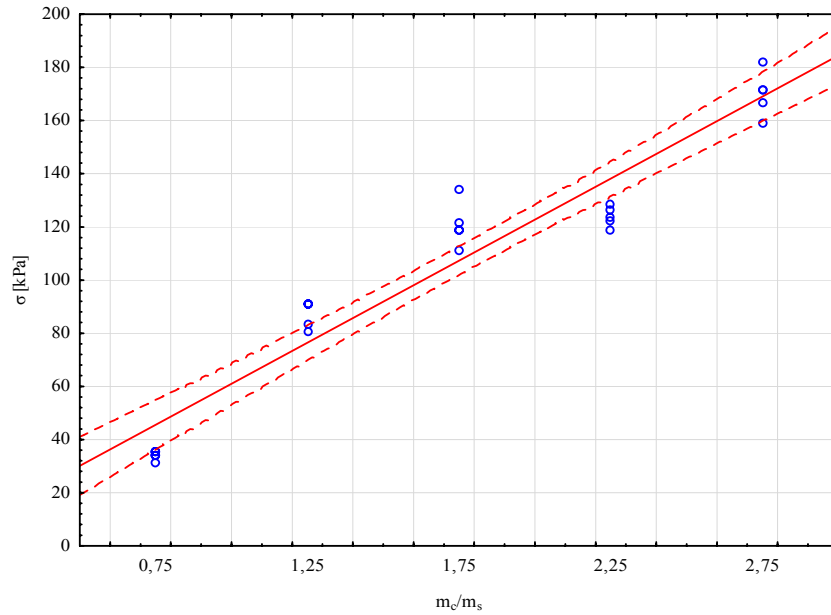
cov(x,y) – kowariancja odpowiednich zmiennych,
s(x) i s(y) – odchylenia standardowe odpowiednich zmiennych.

Współczynnik korelacji Pearsona jest miarą unormowaną i przyjmuje wartości w zakresie [-1, 1], gdzie dodatni znak sugeruje istnienie współzależności dodatniej, a ujemny współzależność ujemną. Im bezwzględna wartość współczynnika korelacji jest bliższa jedności, tym zależność między badanymi cechami jest silniejsza. Kwadrat współczynnika korelacji to współczynnik determinacji r^2 . Informuje on, jaka część zmiany jednej cechy jest wyjaśniana przez zmianę drugiej cechy

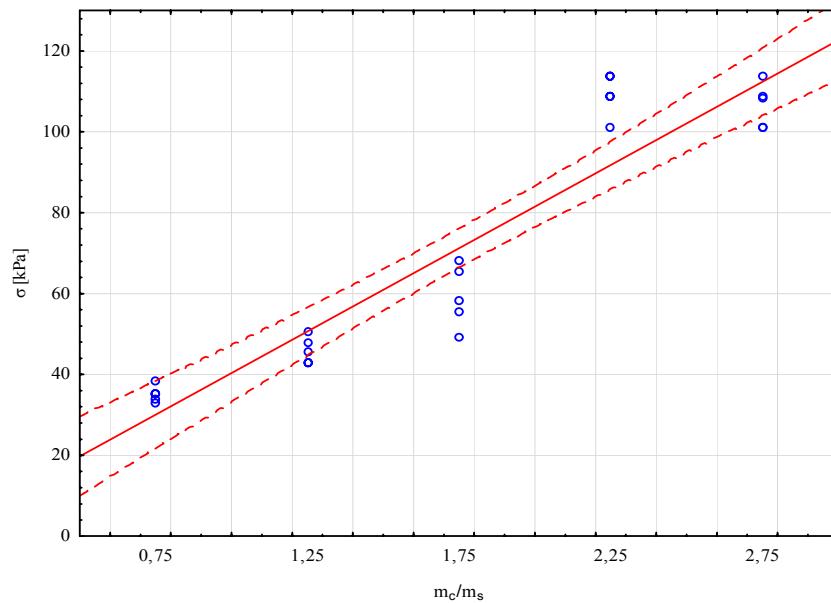
Graficzne przedstawienie współzależności pomiędzy naprężeniami niszczącymi a udziałem cementu w poszczególnych próbkach różniących się zawartością substancji organicznej po 7 dniach dojrzewania przedstawiono na rysunkach 39-42. Zestawienie współczynników korelacji (r), współczynników determinacji (r^2) oraz funkcji regresji przedstawiono w tabeli 25.



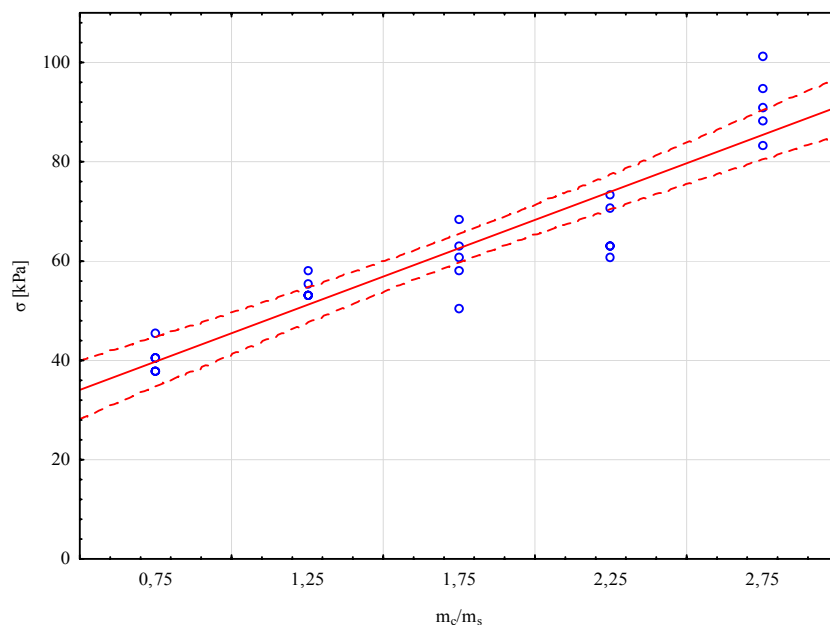
Rys. 39. Prosta regresji i granice przedziałów ufności tej prostej na poziomie 95% dla kompozytów K1-K5 o zawartości substancji organicznej o $I_{om} = 20\%$ po 7 dniach dojrzewania



Rys. 40. Prosta regresji i granice przedziałów ufności tej prostej na poziomie 95% dla kompozytów K6-K10 o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 40\%$ po 7 dniach dojrzewania



Rys. 41. Prosta regresji i granice przedziałów ufności tej prostej na poziomie 95% dla kompozytów K11-K15 o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 60\%$ po 7 dniach dojrzewania



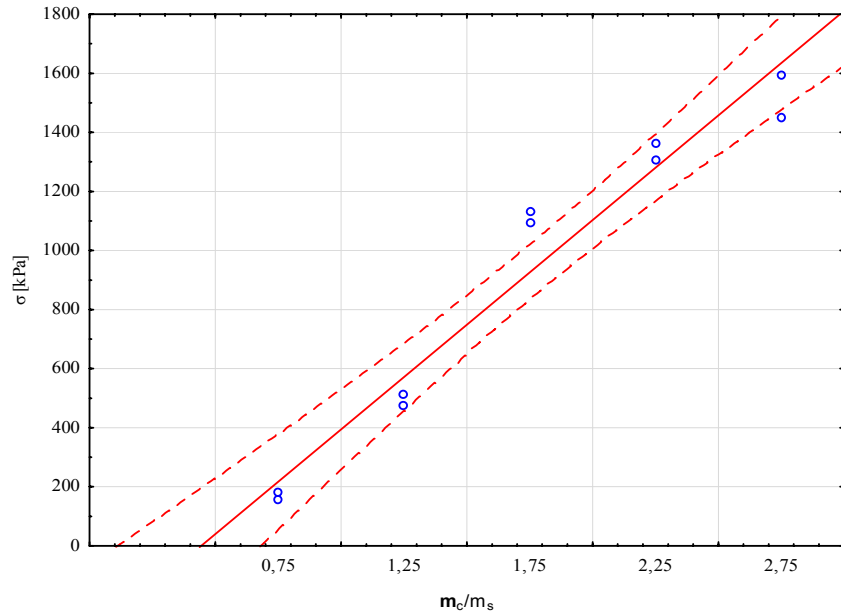
Rys. 42. Prosta regresji i granice przedziałów ufności tej prostej na poziomie 95% dla kompozytów K16-K20 o naturalnej zawartości substancji organicznej po 7 dniach dojrzewania

Tabela 25. Zestawienie współczynników korelacji (r), współczynników determinacji (r^2) oraz funkcji regresji dla próbek cylindrycznych po 7 dniach dojrzewania

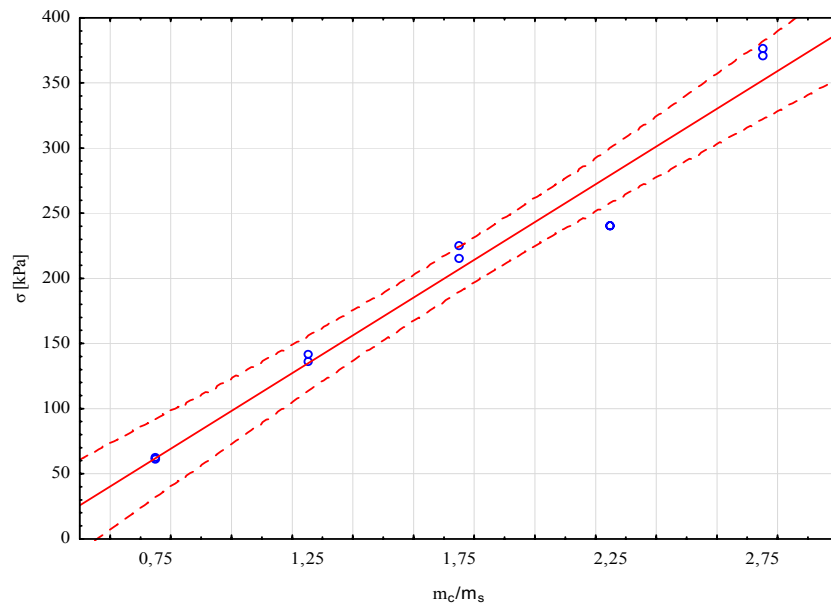
I_{om}	r	r^2	Równanie prostej
20%	0,9587	0,9191	$\sigma = -268,845 + 596,8904 * m_c/m_s$
40%	0,9616	0,9247	$\sigma = -0,8199 + 61,7796 * m_c/m_s$
60%	0,9332	0,8709	$\sigma = -0,7848 + 41,1552 * m_c/m_s$
naturalne	0,9238	0,8534	$\sigma = 22,6248 + 22,8352 * m_c/m_s$

W przypadku prób niszczonych po 7 dniach dojrzewania można zauważyć wysoką dodatnią korelację $r > 0,92$ oraz współczynnik determinacji $r^2 > 0,85$. Świadczy to o silnym prostoliniowym związku między wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie a udziałem cementu.

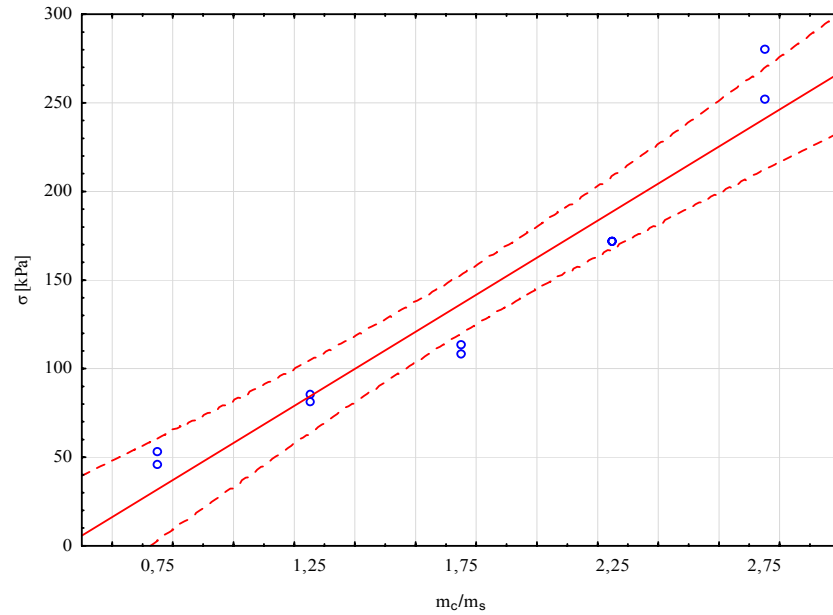
Współzależności na poziomie ufności 95% pomiędzy naprężeniami niszczeniowymi a udziałem cementu w poszczególnych próbkach różniących się zawartością substancji organicznej po 28 dniach dojrzewania przedstawiono na rysunkach 43-46. Poglądowe zestawienie współczynników korelacji (r), współczynników determinacji (r^2) oraz funkcję regresji przedstawiono w tabeli 26.



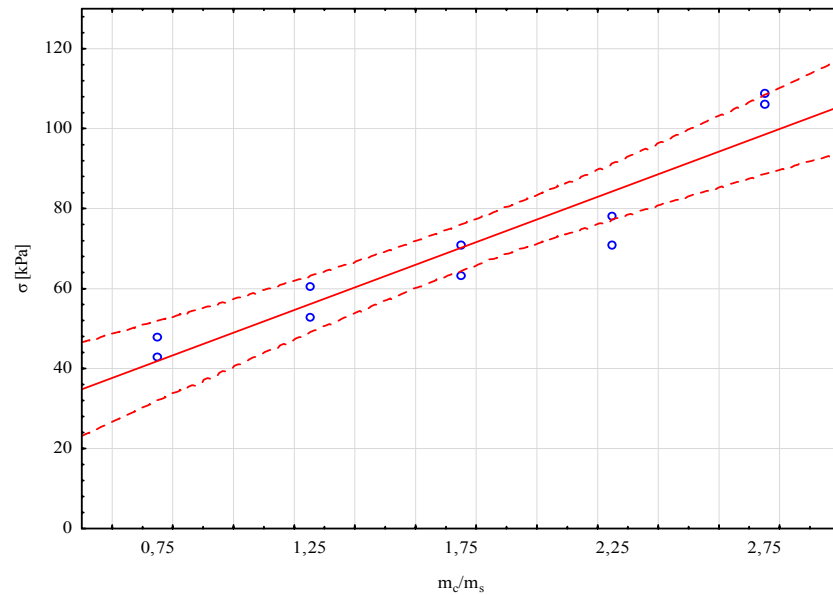
Rys. 43. Prosta regresji i granice przedziałów ufności tej prostej na poziomie 95% dla kompozytów K1-K5 o zawartości substancji organicznej o $I_{om} = 20\%$ po 28 dniach dojrzewania



Rys. 44. Prosta regresji i granice przedziałów ufności tej prostej na poziomie 95% dla kompozytów K6-K10 o zawartości substancji organicznej o $I_{om} = 20\%$ po 28 dniach dojrzewania



Rys. 45. Prosta regresji i granice przedziałów ufności tej prostej na poziomie 95% dla kompozytów K11-K15 o zawartości substancji organicznej o $I_{om} = 20\%$ po 28 dniach dojrzewania



Rys. 46. Prosta regresji i granice przedziałów ufności tej prostej na poziomie 95% dla kompozytów K16-K20 o zawartości substancji organicznej o $I_{om} = 20\%$ po 28 dniach dojrzewania

Tabela 26. Zestawienie współczynników korelacji (r), współczynników determinacji (r^2) oraz funkcji regresji dla próbek cylindrycznych po 28 dniach dojrzewania

I_{om}	r	r^2	Równanie prostej
20%	0,9751	0,9508	$\sigma = -313,8275+708,73*m_c/m_s$
40%	0,9792	0,9587	$\sigma = -46,8568+144,981*m_c/m_s$
60%	0,9637	0,9287	$\sigma = -46,603+104,568*m_c/m_s$
naturalne	0,9428	0,8889	$\sigma = 20,712+28,288*m_c/m_s$

W przypadku próbek niszczonej po 28 dniach dojrzewania widać również jak w przypadku próbek badanych po 7 dniach, wysoką dodatnią korelację $r > 0,94$ oraz współczynnik determinacji $r^2 > 0,89$. Świadczy to o silnym prostoliniowym związku między wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie a udziałem cementu.

4.1.6. Wnioski podsumowujące badania wytrzymałości kompozytu

Podczas procesu formowania i dojrzewania próbek kompozytu ujawniło się wiele trudności i czynników mających wpływ na ich końcową wytrzymałość, co było widoczne w szczególności w przypadku próbek sześciennych. Brak możliwości zapewnienia stałych warunków dojrzewania, występowanie pleśni czy niejednorodność powierzchni miały niewątpliwie duży wpływ na ich końcową wytrzymałość. W przypadku badania materiału organicznego, z natury charakteryzującego się dużą zmiennością parametrów, wystąpienie dodatkowych, niechcianych zmiennych powoduje zmniejszenie wiarygodności badań. Z tego względu na tym etapie badań zrezygnowano ze stosowania form sześciennych w badaniach kompozytów gruntowych. Proces przygotowania próbek na bazie gruntów organicznych ukazał ogromny wpływ dojrzewania i konieczność utrzymania jego stałych warunków na uzyskanie miarodajnych rezultatów eksperymentu.

Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, że w przypadku kompozytów gruntowych nie można prognozować ostatecznej wytrzymałości, kierując się zależnościami stosowanymi dla betonu. Zaobserwowano, że wzrost wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie po 28 dniach dojrzewania w stosunku do 7 dni w przypadku kompozytów gruntowych tworzonych na bazie gruntów organicznych jest zdecydowanie wyższy niż w przypadku betonu. Wzrost ten w zależności od zawartości substancji organicznej i udziału cementu wynosi nawet 150,1%. Ponadto wzrost wytrzymałości kompozytów grunt organiczny-spoivo po 7 dniach dojrzewania był zdecydowanie mniej gwałtowny niż po 28 dniach. Związane jest to z opóźnieniem wiązania zaczynu przez zawarte w substancji organicznej kwasy humusowe.

Warto wspomnieć, że w przypadku badanych próbek wzrost wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie nie zawsze był proporcjonalny do wzrostu wartości modułów odkształceń. W przypadku wybranych kompozytów wzrost wartości modułu był kilkukrotnie wyższy od wzrostu wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie. Oznacza to, że w przypadku oceny skuteczności wzmocnienia słabego podłoża organicznego samo określenie wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie może nie być wystarczające.

Odpowiedni dobór ilości spoiwa i wypełniacza w postaci kruszywa pozwala nie tylko zapewnić odpowiednią nośność kompozytu, ale również przewidzieć zachowanie się projektowanego kompozytu pod zadaniem obciążeniem. Im mniejsza zawartość substancji organicznej I_{om} i wyższy stosunek m_c/m_s , tym dłuższy zakres liniowych odkształceń i mniejsze odkształcenia plastyczne. Jak wskazują wyniki badań możliwe jest uzyskanie kompozytów stosunkowo sztywnych, zachowujących się jak materiał kruchy. Próbki cylindryczne takich rodzajów kompozytów pękają w sposób podobny jak smukłe próbki betonowe, co przedstawiono na rysunku 47a. Widoczna jest wyraźna płaszczyzna ścinania. Słabsze kompozyty o wyższej zawartości substancji organicznej charakteryzowały się dużymi odkształceniami plastycznymi. Sposób zniszczenia tych próbek wiązał się z deformacją próbki zwłaszcza w jej dolnej strefie i brakiem wyraźnej płaszczyzny ścinania (rys. 47b).

a)



b)



Rys. 47. Sposób zniszczenia ściskanych próbek cylindrycznych: a) kruche ściecie, b) zniekształcenie próbki bez wyraźnej płaszczyzny ścinania

4.2. BADANIE ODCZYNU PH KOMPOZYTU

4.2.1. Wprowadzenie

Efektywność wzmocnienia słabonośnego podłoża organicznego można wstępnie określić bez konieczności stosowania badań niszczących, zwykle wyznaczających ich wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie. Jednym z takich badań, jest określenie stężenia jonów wodorowych, bardziej znane jako pH.

W środowisku kwaśnym, na przykład w obecności kwasów humusowych, będących częścią substancji organicznej, pH zaczynu ulega obniżeniu. Jego prawidłowe wiązanie odbywa się w środowisku silnie alkalicznym. Po wymieszaniu wody z cementem pH rośnie i utrzymuje się na poziomie około 12,5. Uważa się, że zaczyn z cementu portlandzkiego jest nietrwały w środowisku o pH mniejszym od 10-10,5 [25]. Można więc przyjąć, że mieszanki na bazie gruntów organicznych stabilizowane zbyt małą ilością cementu nie osiągną odpowiedniego odczynu, co w konsekwencji może prowadzić do nieprawidłowego wiązania kompozytu.

Korzystając z doświadczeń wcześniej przeprowadzanych badań [101] można przyjąć, że jeżeli pH roztworu zawartego w porach kompozytu jest niższe od 9, to mieszanka nie będzie miała oczekiwanej wytrzymałości [101]. Według innych badań wzmocnianie gruntów organicznych o $\text{pH} < 5$, zużyciem zaczynu cementowego jest nieskuteczne [79].

4.2.2. Opis aparatury i stanowiska pomiarowego

Do badania zastosowano przenośny i wodoszczelny miernik pH wyprodukowany przez firmę Hanna Instruments (rys. 48). Urządzenie zaopatrzone jest w inteligentną, kombinowaną elektrodę, umożliwiającą dokładny i szybki pomiar odczynu i temperatury bezpośrednio w badanym gruncie. Wybrane parametry urządzenia:

- zakres działania: -2,00 do 16,00 pH, -5,0 do 105,0°C,
- rozdzielczość: 0,01 pH, 0,1°C,
- dokładność: $\pm 0,02$ pH, $\pm 0,5^\circ\text{C}$ do 60°C , 1°C (na zewnątrz),
- zakłócenia EMC: $\pm 0,02$ pH, $\pm 0,2^\circ\text{C}$,
- automatyczna kompensacja temperatury,
- automatyczna jedno- lub dwupunktowa kalibracja pH z dwóch zestawów zapamiętanych buforów.



Rys. 48. Miernik pH firmy Hanna Instruments, model HI 99121 zaopatrzony w elektrodę kombinowaną model HI 1292D

4.2.3. Metoda pomiaru

Pomiar odczynu kompozytów wykonany został w czasie mieszania poszczególnych składników za pomocą metod elektrooporowych – cyfrowego miernika pH. Zastosowana elektroda umożliwiła bezpośredni odczyt pH. Badaniu poddane zostały wszystkie mieszanki po 10 minutach od połączenia składników. Przed każdym badaniem urządzenie było kalibrowane w dostarczonych przez producenta roztworach kalibracyjnych. Wykonano po dwa odczyty dla każdego z kompozytów, po uprzednim ustabilizowaniu się miernika.

Podczas oznaczania wartości pH zwracano szczególną uwagę na warunki, w jakich przeprowadzany był pomiar. Podczas oceny wyników pomiarów zastosowano wytyczne z załącznika N normy [115].

4.2.4. Przygotowanie próbek

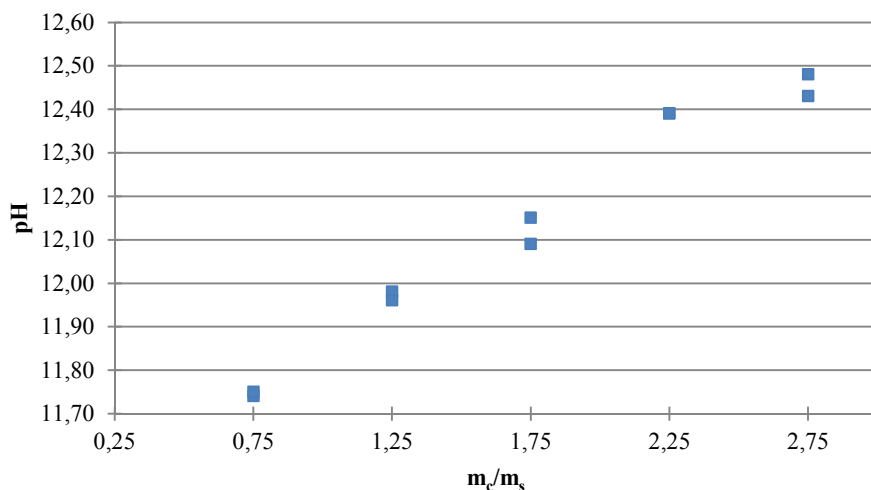
Zastosowana kombinowana elektroda pozwoliła na bezpośredni pomiar w czasie procesu mieszania kompozytu. Przygotowanie próbek ograniczyło się do wykonania w badanym ośrodku otworu dla elektrody specjalnym świdrem oraz w przypadku bardzo suchych mieszanek dodawano wody destylowanej.

Zwilżone musiały zostać przede wszystkim próbki kompozytów o najniższej zawartości substancji organicznej (kompozyty K1-K5).

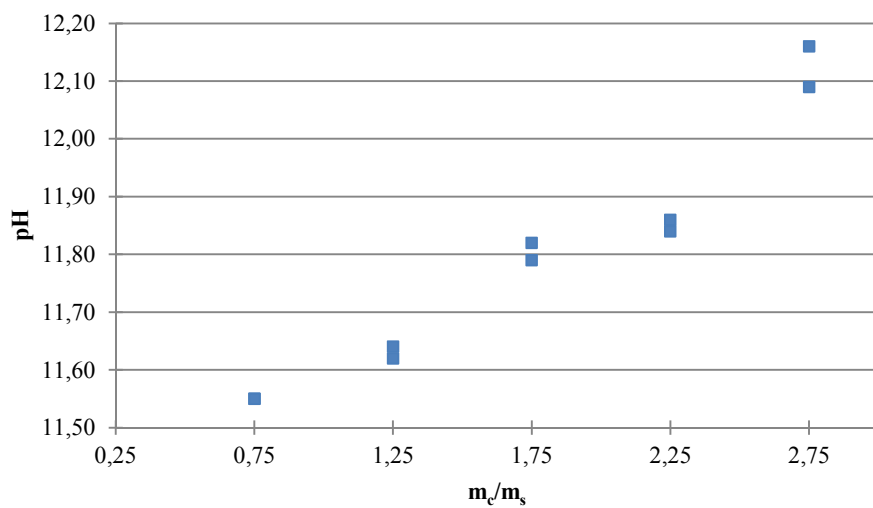
Dla potwierdzenia możliwości stosowania odczynu pH jako wyznacznika prognozującego efektywność wzmocnienia słabonośnego podłoża, parametr ten został określony dla kompozytów K1-K20.

4.2.5. Wyniki i analiza badań

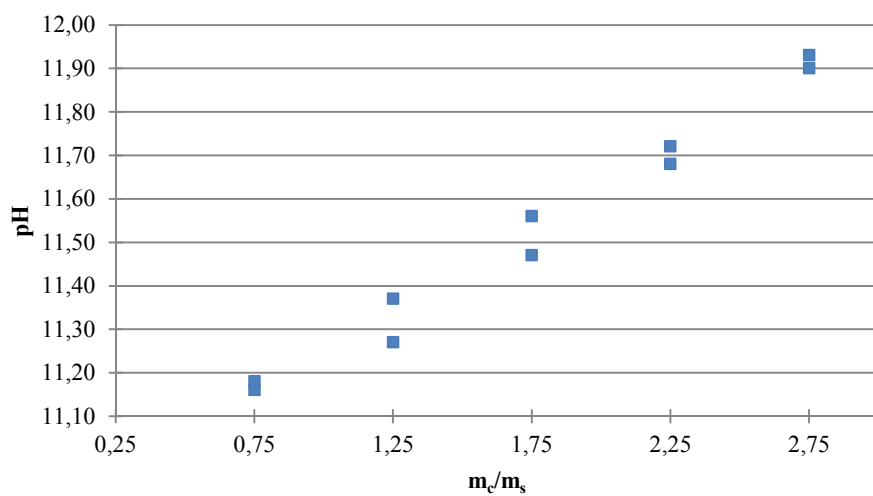
Wszystkie mieszanki osiągnęły $\text{pH} > 9$. Zatem według [101] powinny uzyskać oczekiwaną wytrzymałość na ściskanie. Najniższą wartością pH zgodnie z oczekiwaniami charakteryzowały się kompozyty K11 ($I_{\text{om}} = 60\%$, $m_c/m_s = 0,75$) i K16 ($I_{\text{om}} = 83,64, 84,40\%$ i $m_c/m_s = 0,75$) o najwyższej zawartości substancji organicznej i najniższej zawartości cementu. Analogicznie najwyższe wartości uzyskały kompozyty K5 ($I_{\text{om}} = 20\%$, $m_c/m_s = 2,75$) i K10 ($I_{\text{om}} = 40\%$, $m_c/m_s = 2,75$) o najniższej zawartości substancji organicznej i najwyższej zawartości cementu. Co ciekawe, mimo znacznych różnic w ilości dodawanego cementu i piasku kwarcowego zakres oznaczonych wartości odczynu pH dla wszystkich kompozytów był stosunkowo niewielki. Zakres uzyskanych odczynów pH wynosił: 11,74-12,48 dla zawartości substancji organicznej $I_{\text{om}} = 20\%$, 11,55-12,16 dla $I_{\text{om}} = 40\%$, 11,16-11,93 dla $I_{\text{om}} = 60\%$ oraz 11,46-11,85 dla $I_{\text{om}} = 83,64 (84,40)\%$. Wyniki badań dla poszczególnych kompozytów przedstawiono na rysunku 49-52. Zauważono, że im wyższa zawartość substancji organicznej, tym większe były rozbieżności wyników, co szczególnie widać na przykładzie kompozytów K16-K20 (rys. 52). Z dużym prawdopodobieństwem można stwierdzić, że spowodowane jest to dużą zawartością substancji organicznej i wynikającej z jej obecności porowatej struktury.



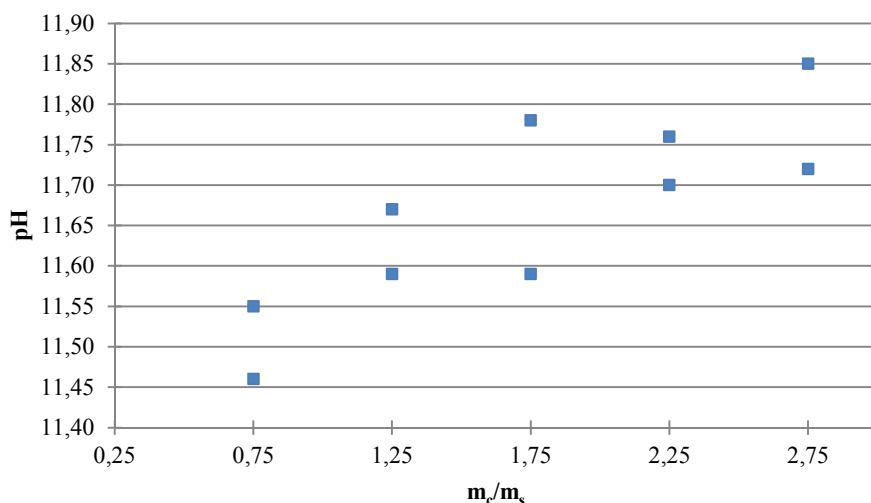
Rys. 49. Odczyn pH kompozytów K1-K5 o zawartości substancji organicznej $I_{\text{om}} = 20\%$ w zależności od ilości dodawanego spoiwa



Rys. 50. Odczyn pH kompozytów K6-K10 o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 40\%$ w zależności od ilości dodawanego spoiwa



Rys. 51. Odczyn pH kompozytów K11-K15 o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 60\%$ w zależności od ilości dodawanego spoiwa



Rys. 52. Odczyn pH kompozytów K16-K20 o naturalnej zawartości substancji organicznej $I_{om} = 83,64$ (84,40)% w zależności od ilości dodawanego spoiwa

4.3. OKREŚLENIE ZAWARTOŚCI WYBRANYCH SKŁADNIKÓW ORGANICZNYCH KOMPOZYTU

4.3.1. Wprowadzenie

Swoiste związki próchnicze wchodzące w skład substancji organicznej niekorzystnie wpływają na wiązanie zaczynu cementowego. Kwasy humusowe będące ich częścią są związkami charakteryzującymi się wysoką aktywnością chemiczną. Spośród nich wyróżnić można kwasy fulwowe (KF) i huminowe (KH). Wzajemny stosunek tych kwasów ma istotny wpływ na parametry fizyczne i fizykochemiczne [31] gruntów (między innymi hydrofilności, zdolności sorpcyjnych).

Dokładną charakterystykę kwasów humusowych, a także ich wpływ na wiązanie zaczynu cementowego omówiono we wprowadzeniu do pracy.

4.3.2. Opis aparatury i stanowiska pomiarowego

Oznaczenie wykonano w Katedrze Chemii Środowiska na Wydziale Rolnictwa i Biotechnologii Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy. Analiza elementarna wykonana została analizatorem Vario Max CN wyprodukowanym przez firmę Elementar. Rozfrakcjonowanie próchnicy wykonano za pomocą metody wykorzystującej różną rozpuszczalność jej składników w wybranych rozpuszczalnikach. Badania przeprowadził pracownik katedry mgr inż. Jarosław Pakuła.

4.3.3. Metoda pomiaru

Analiza elementarna wykonana została urządzeniem działającym na zasadzie wysokotemperaturowego spalania próbek. Dalszy podział na frakcje substancji próchnicznych oparty został na metodzie Schnitzera [39, 94]. Przed rozpoczęciem ekstrakcji kwasów humusowych za pomocą 0,1M HCl przeprowadzono dekalcytację, czyli usunięcie węglanów z badanych próbek. Proces wydzielania kwasów humusowych (KF i KH) z badanego materiału przeprowadzono z użyciem 0,5M NaOH. Następnie w celu wytrącenia kwasów huminowych zastosowano 2M HCl. W wyniku przedstawionych w dużym uproszczeniu działań wydzielono po dekalcytacji zawartość węgla organicznego we frakcji kwasów huminowych i fulwowych (w g/kg oraz procentową), a także wzajemny stosunek kwasów huminowych do fulwowych C_{KH} / C_{KF} . Pozostałość w składzie frakcyjnym niebędąca kwasami humusowymi oznaczono jako „humin”.

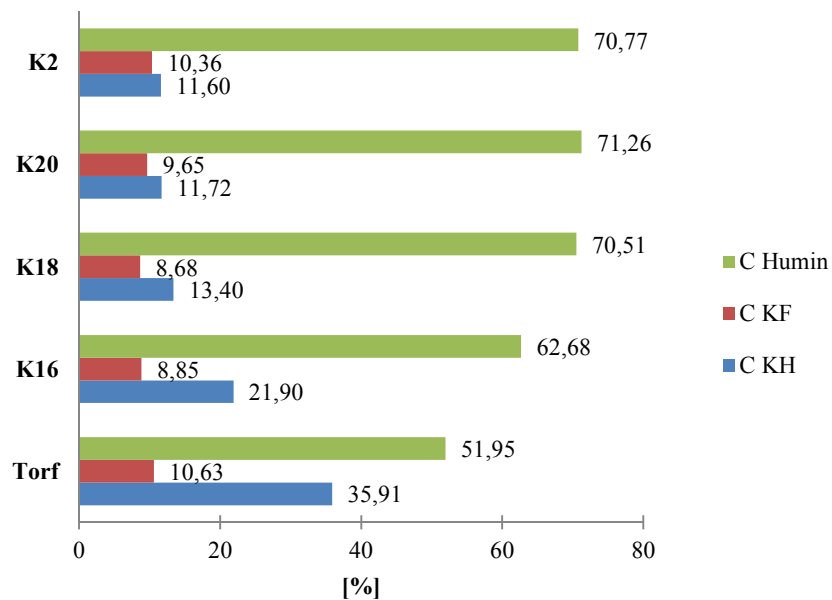
4.3.4. Przygotowanie próbek

Przygotowanie próbek polegało na wysuszeniu ich do stałej masy, a następnie rozdrobieniu w moździerzu. Następnie zabezpieczono je przed chłonięciem wilgoci z powietrza i przetransportowano do laboratoriów Wydziału Rolnictwa i Biotechnologii UTP w Bydgoszczy.

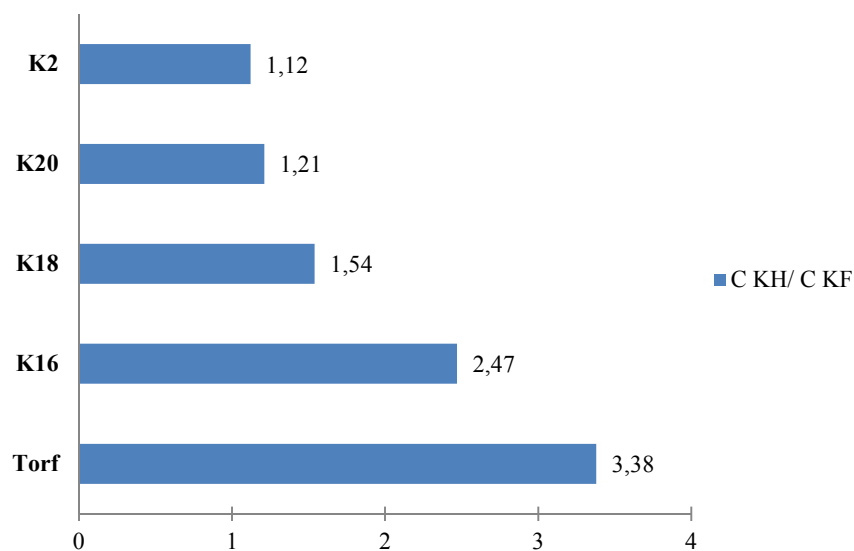
Skład frakcyjny określono dla próbki niewzmocnionego torfu, a także dla kompozytów 16, 18, 20 (K16, K18, K20), o naturalnej i niezmienionej zawartości substancji organicznej o stosunku masy dodanego cementu do masy suchego gruntu odpowiednio $m_c/m_s = 0,75, 1,75, 2,75$ i kompozytu 2 (K2) o zawartości substancji organicznej równej $I_{om} = 20\%$ oraz $m_c/m_s = 1,25$. Uznano, że najistotniejsze jest określenie składu frakcyjnego kompozytów na bazie samego torfu, bez dodatku obojętnego chemicznie piasku kwarcowego.

4.3.5. Wyniki i analiza badań

Torfy według [4, 31] zawierają 10-43% kwasów huminowych i 5,5-25% kwasów fulwowych. Analizowane próbki torfu pobranego z kopalni Nowe Dąbie mieszczą się w tym zakresie. Zawierają 35,91% kwasów huminowych KH i 10,63% kwasów fulwowych. Procentową zawartość wybranych frakcji substancji próchnicznych w badanych próbkach przedstawiono na rysunku 53, natomiast stosunek kwasów huminowych do fulwowych – rysunku 54.



Rys. 53. Procentowa zawartość wybranych frakcji substancji próchnicznych w badanych próbkach



Rys. 54. Wzajemny stosunek kwasów huminowych do fulwowych w badanych próbkach

Próbka K18 zawiera ponad 8% mniej kwasów huminowych i praktycznie tę samą ilość kwasów fulwowych co próbka K16. Tym samym charakteryzuje się ponad dwukrotnie większym udziałem cementu w swoim składzie. Próbka K20 ma niecałe 2% mniej kwasów huminowych i blisko 1% więcej kwasów fulwowych niż K18 i w składzie ponad 1,5 razy więcej cementu. Z kolei K2 ma nieporównywalnie większy dodatek cementu od kompozytów 16, 18, 20. Ma go prawie dwukrotnie więcej od próbki K20. Mimo tak dużego udziału zasadowego spoiwa wpływ na zawartość kwasów huminowych nie jest już tak wyraźny. Widoczny jest mniejszy udział kwasów huminowych i niewielki wzrost zawartości kwasów fulwowych.

Analizując uzyskane dane, można stwierdzić, że zawartość kwasów huminowych maleje, a fulwowych nieznacznie rośnie wraz ze wzrastającą zawartością dodawanego cementu. Można także zauważyć, że po przekroczeniu pewnej granicznej wartości udziału cementu, jego dalsze dodawanie nie wpływa znacząco na obniżenie zawartości kwasów huminowych. Jest to wyraźnie zauważalne w przypadku próbek K20 i K2. Kompozyty mają bardzo podobny udział frakcji próchnicznych i zbliżony stosunek kwasów huminowych do fulwowych C_{KH}/C_{KF} wynoszący odpowiednio 1,21 i 1,12. Interesującym zjawiskiem jest wzrastającą zawartość kwasów fulwowych wraz ze wzrostem ilości dodawanego cementu. W przyszłości zjawisko to należy poddać szczegółowej analizie.

4.4. ANALIZA TOMOGRAFICZNA

4.4.1. Wprowadzenie

Rentgenowski tomograf komputerowy (TK lub z angielskiego CT – *Computed Tomography*) jest jednym z najpopularniejszych urządzeń diagnostycznych używanych w medycynie. Ma zadziwiające możliwości badawcze umożliwiające w sposób bezinwazyjny uzyskać trójwymiarowy obraz wnętrza badanego medium przedstawianego badaczowi w postaci plastrów (greckie – *tomos*) z opisem (*graphia*). Za wynalzców urządzenia uważa się Allana MacLeoda Cormacka i Godfrea Newbolda Hounsfielda. Pierwszy tomograf według ich pomysłu zaczęto stosować na początku lat 70. ubiegłego wieku [8]. Tomografia komputerowa zrewolucjonizowała obrazowanie biomedyczne i coraz częściej znajduje zastosowanie w innych dziedzinach nauki, również w geotechnice.

Tomografia zalicza się do badań nieniszczących, a zarazem nieinwazyjnych. Oznacza to, że nie zmienia właściwości chemicznych i fizycznych próbki, a ponieważ nie jest konieczne wprowadzenie jakichkolwiek urządzeń pomiarowych do jej wnętrza, nie niszczy jej struktury (poza samym pobraniem próbki). Przygotowanie do badań nie wymaga zatem preparatyki laboratoryjnej, co pozwala zaoszczędzić czas i ograniczyć koszt badań [40].

Według [96] w 1982 roku po raz pierwszy użyto rentgenowskiego tomografu komputerowego do analizy gruntów. Prowadzone przez Petrovica i innych badania [88] potwierdziły liniową zależność między gęstością gruntu

a osłabieniem przechodzącego przez tenże grunt natężenia strumienia promieniowania rentgenowskiego. Rozszerzanie zastosowania TK do badań gruntów było ściśle uzależnione od wzrastających w czasie trzech dekad możliwości pomiarowych urządzeń. Obecnie, w geotechnice używa się tomografów przede wszystkim w jakościowym oraz ilościowym badaniu struktury gruntów, w szczególności występujących tam porów, ocenie warunków hydrofizycznych, a także badań gęstości [40]. Używane są zarówno medyczne rentgenowskie tomografy komputerowe, jak i tomografy przemysłowe oraz mikrotomografy (μ CT).

Ze studiów literaturowych prac dotyczących zastosowania tomografii komputerowej w badaniach gruntów wynika, że w odróżnieniu od mineralnych zdecydowanie mniej uwagi badaczy interesuje się organicznymi składnikami gruntów. TK otwiera szczególne szerokie możliwości zbadania tych składników, gdyż właśnie do badania tego typu materii została stworzona.

Zainteresowanie materią organiczną w gruntach związane jest z badaniami zarówno ich ożywionej, jak i nieożywionej części. W przypadku tej pierwszej, analizie za pomocą TK poddawana jest fauna, flora oraz mikroorganizmy występujące w gruncie. Badane jest między innymi występowanie i przestrzenne rozłożenie systemów korzeniowych roślin [68] występowanie i przemieszczanie się charakterystycznych organizmów [71] i mikroorganizmów [85], a nawet przestrzenne rozłożenia drążonych przez dżdżownice korytarzy [55].

Bardziej interesujące, ze względu na tematykę pracy autora, są jednak wyniki badań części nieożywionych – substancji organicznej, będącej głównym składnikiem gruntów organicznych. W przypadku występowania wysokiej zawartości substancji organicznych, uwaga skupiona jest przede wszystkim na ocenie wybranych właściwości fizycznych i warunkach hydrofizycznych gruntów. TK znalazł zastosowanie między innymi do analizy struktury gruntu [95], zawartości biogazów [77] czy wpływu wielkości i kształtu porów na przepływ wody w torfie [91, 92].

Jak dotąd w Polsce nie stosowano w badaniach naukowych (według wiedzy autora) tomografu komputerowego do analiz kompozytów gruntowych stabilizowanych cementem metodą mieszania *in situ*. Dobra dostępność urządzeń medycznych, brak konieczności preparatyki próbek, a także liczne prace naukowe potwierdzające skuteczność stosowania tych urządzeń do badań zaczynu cementowego [52] zainspirowały autora do przeprowadzenia badań kompozytów gruntowych z wykorzystaniem tomografu komputerowego.

4.4.2. Opis aparatury i stanowiska pomiarowego

Obrazowanie zostało przeprowadzone w Zakładzie Radiologii Kujawsko-Pomorskiego Centrum Pulmonologii w Bydgoszczy. Do badań zastosowano 16-rzędowy spiralny tomograf komputerowy firmy Siemens – model Somatom Emotion – 16 (rys. 55). Urządzenie obsługiwane było przez pracownika szpitala mgr. Jerzego Wojdona.



Rys. 55. 16-rzędowy spiralny tomograf komputerowy firmy Siemens – model Somatom Emotion – 16 podczas badania próbek cylindrycznych

Próbki ustawiono tak, aby przesuw stołu urządzenia był zgodny z dłuższą osią badanych próbek cylindrycznych (osią symetrii). Grubość przekrojów na potrzeby badań ustawiono na wartość 1mm. Przedstawione obrazy dwuwymiarowe miały rozdzielczość 512x512 pikseli. Wszelkie analizy przeprowadzono na powszechnie dostępnym oprogramowaniu OSIRIX do przeglądania i przetwarzania obrazów do celów medycznych w formacie DICOM.

Od powstania pierwszych urządzeń, przez następne 40 lat udoskonalano budowę rentgenowskich tomografów komputerowych. Od połowy lat 90. nastąpił rozwój tomografów spiralnych (helikalnych), w których lampa rentgenowska obraca się wokół badanego obiektu przy jednoczesnym posuwistym ruchu stołu (wzdłuż dłuższej osi badanego obiektu). Najbardziej zaawansowaną generacją urządzeń są wieloprzekrojowe spiralne aparaty tomograficzne z wiązką promieniowania uformowaną w stożek. Dzięki zastosowaniu tablicy składającej się z wielu rzędów detektorów, możliwe jest jednoczesne uzyskanie kilku sąsiadujących ze sobą przekrojów. Obecnie, najnowocześniejsze tomografy mają 256, a nawet 320 rzędów detektorów i mogą być wyposażone nawet w dwie lampy rentgenowskie [8, 10].

W skład tomografu niezależnie od generacji urządzenia wchodziły zestaw elementów. Można wyróżnić między innymi [2, 8]:

- system akwizycji danych, wykorzystujący promienie rentgenowskie,
- system komputerowy przetwarzający dane i rekonstruujący obrazy z projekcji,

- system prezentacji obrazu pozwalający na wizualizację i kontrolę bieżącej pracy urządzenia, umieszczony w pomieszczeniu kontrolnym wraz z konsolą operatorską,
- urządzenie zasilające tomograf w prąd,
- systemy archiwizacji danych.

Najważniejszą i najbardziej rozpoznawalną częścią urządzenia jest system akwizycji danych. Jego częściami składowymi są [8]:

- brama, powszechnie nazywana gantrą,
- lampa rentgenowska,
- tablica detektorów,
- stół umożliwiający w sposób ręczny lub zautomatyzowany odpowiednie ułożenie badanego materiału.

4.4.3. Metoda pomiaru i podstawy działania

Tomograf komputerowy dzięki odpowiednim algorytmom matematycznym pozwala zrekonstruować pojedyncze przekroje – zdjęcia rentgenowskie w trójwymiarową wizualizację. Nie byłoby to możliwe bez wsparcia wydajnych komputerów zdolnych do jednoczesnego przetwarzania wielu informacji. Idea działania tomografu pojawiła się dość wcześnie, ale dopiero rozwój nauk informatycznych i technik obliczeniowych umożliwił opracowanie odpowiedniego urządzenia [8].

Tomografia jest techniką wykorzystującą promienie rentgenowskie. Źródło promieniowania, poruszając się po okręgu prześwietla wąską wiązką badany obiekt. Proces ten jest powtarzany wielokrotnie dla różnych kątów między osią lampa – obiekt – detektor a pionem. Wewnątrz badanego obiektu następuje szereg procesów fizycznych. W zależności od wartości współczynnika absorpcji danego materiału następuje różne osłabienie przechodzącego promieniowania rentgenowskiego, rejestrowane przez detektory umieszczone po przeciwnej stronie lamp. Interpretacja uzyskanych wartości pochłaniania promieniowania rentgenowskiego w poszczególnych projekcjach pozwala na zrekonstruowanie obrazu przekrojów. Dalsza analiza z użyciem odpowiedniego oprogramowania umożliwia stworzenie przestrzennego obrazu badanego obiektu [7, 8, 10].

W praktyce wartość współczynnika pochłaniania promieniowania rentgenowskiego określa się w jednostkach Hounsfielda HU (z ang. *Hounsfield Units*). W systemie tym liczbę HU poszczególnych pikseli przelicza się, odnosząc uzyskaną wartość pochłaniania do wartości oznaczonej dla wody (wartość referencyjna) zgodnie ze wzorem (3) [10]:

$$HU = [(\mu_{\text{piksela}} - \mu_{\text{wody}}) / \mu_{\text{wody}}] \times 1000 \quad (3)$$

gdzie:

- HU – jednostka Hounsfielda,
- μ_{piksela} – współczynnik pochłaniania piksela (w przypadku rekonstrukcji przestrzennej – voxela),
- μ_{wody} – współczynnik pochłaniania wody.

Wartości liczb Hounsfielda w obrazowaniu biomedycznym mieszczą się w zakresie od -1000 dla gazów, poprzez 0 dla wody, do +4000 dla kości. Dla większej przejrzystości system akwizycji danych przypisuje wartościom liczbowym skalę odcieni szarości (każdemu pikselowi przypisana jest odpowiednia gęstość wyrażona za pomocą tej skali). Niestety, możliwości ludzkiego oka do ich rozróżniania są ograniczone. Dla zmniejszenia ich zakresu do 256 odcieni (ilość odcieni wyświetlana przez tradycyjne monitory w 8-bitowej głębi barw) stosuje się okno, czyli fragment skali definiowany przez jego środek C , WL (z ang. *window center* lub *window level*) i szerokość W , WW (z ang. *window width*). Środek okna to inaczej środek zastosowanej skali, a szerokość to pełen jej zakres. W zależności od potrzeb i rodzaju materiału stosuje się odpowiednie wartości tych parametrów. Specjalne oprogramowanie umożliwia zastosowanie wielu różnych programów tematycznych umożliwiających wyszczególnienie charakterystycznych obszarów badanego materiału [7, 2, 8].

4.4.4. Przygotowanie próbek

Przygotowanie do badań nie wymagało pracochłonnej preparatyki i ograniczało się wyłącznie do samego przygotowania kompozytów o odpowiednim kształcie, wymiarach i udziale składników. Konieczne było owinięcie próbek folią, aby zabezpieczyć je przed przypadkowym zniszczeniem, a także nie zanieczyścić stołu urządzenia, będącego na wyposażeniu szpitala.

Wykonano tomogramy dwóch przykładowych próbek cylindrycznych o różnym udziale cementu i substancji organicznej. Pierwsza z próbek, kompozyt K3, charakteryzowała się zawartością substancji organicznej $I_{om} = 20\%$ i stosunkiem masy dodanego cementu do masy suchego gruntu $m_c/m_s = 1,75$. Druga z nich, kompozyt K19 miała naturalną zawartość substancji organicznej oraz stosunek $m_c/m_s = 2,25$.

4.4.5. Wyniki i analiza badań

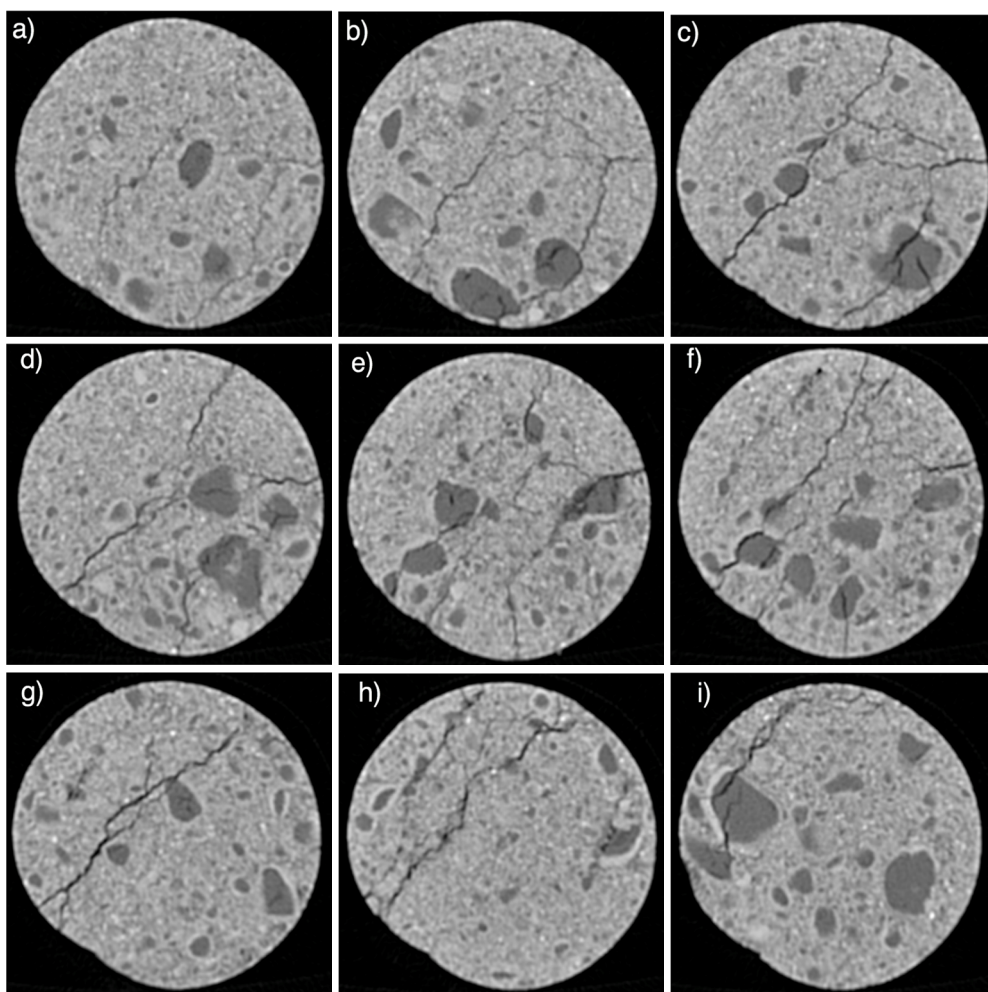
Na tym etapie wiedzy przedstawiono jedynie jakościową analizę uzyskanych obrazów, szczególnie zwracając uwagę na możliwości oprogramowania i potencjalne dalsze wykorzystanie medycznego rentgenowskiego tomografu komputerowego w badaniach kompozytów. Badania te mają charakter pogładowy, a wnioski posłużą do wytyczenia kierunku dalszych prac autora.

Na rysunku 56 przedstawiono zdjęcia próbki K3 bezpośrednio po oznaczeniu wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie. Na jednym z nich zaznaczono kolorem czerwonym powstałe w czasie niszczenia pęknięcia. Na podstawie tego obrazu możemy co najwyżej określić zasięg pęknięć oraz typ odkształcenia powstałego w wyniku przeprowadzonych badań. Widoczny jest charakterystyczny sposób zniszczenia – ukośne kruche ścinanie. Niestety, tylko takie wnioski można wyciągnąć na podstawie makroskopowej analizy próbek kompozytu.



Rys. 56. Zniszczone próbki kompozytu K3 bezpośrednio po badaniach wytrzymałościowych

Jakościowa analiza tej samej próbki za pomocą TK daje szereg niespotykanych jak dotąd możliwości obserwacji mechanizmów jej zniszczenia. Na rysunku 57 przedstawiono wybrane przekroje poprzeczne przez próbkę K3. Prześladowano, zaczynając od góry do około połowy wysokości próbki, występujące w niej pęknięcia. Już pobieżne obserwacje pozwalają zaobserwować pewne prawidłowości. Miejsce wystąpienia i zasięg ściecia próbki jest zależny od występujących w kompozycie nierozdrobnionych agregatów organicznych. Jest to szczególnie widoczne na rysunku 57b, 57c oraz 57f, gdzie pęknięcia wybierają sobie drogę przez organiczne osłabienia (widoczne na zdjęciach jako ciemniejsze skupienia) zgodnie z jedną z fundamentalnych zasad mechaniki – zasadą najmniejszego działania Hamiltona [43]. Potwierdza to duży wpływ homogenizacji na końcową wytrzymałość kompozytu i zasadność stosowania do jej oceny TK.

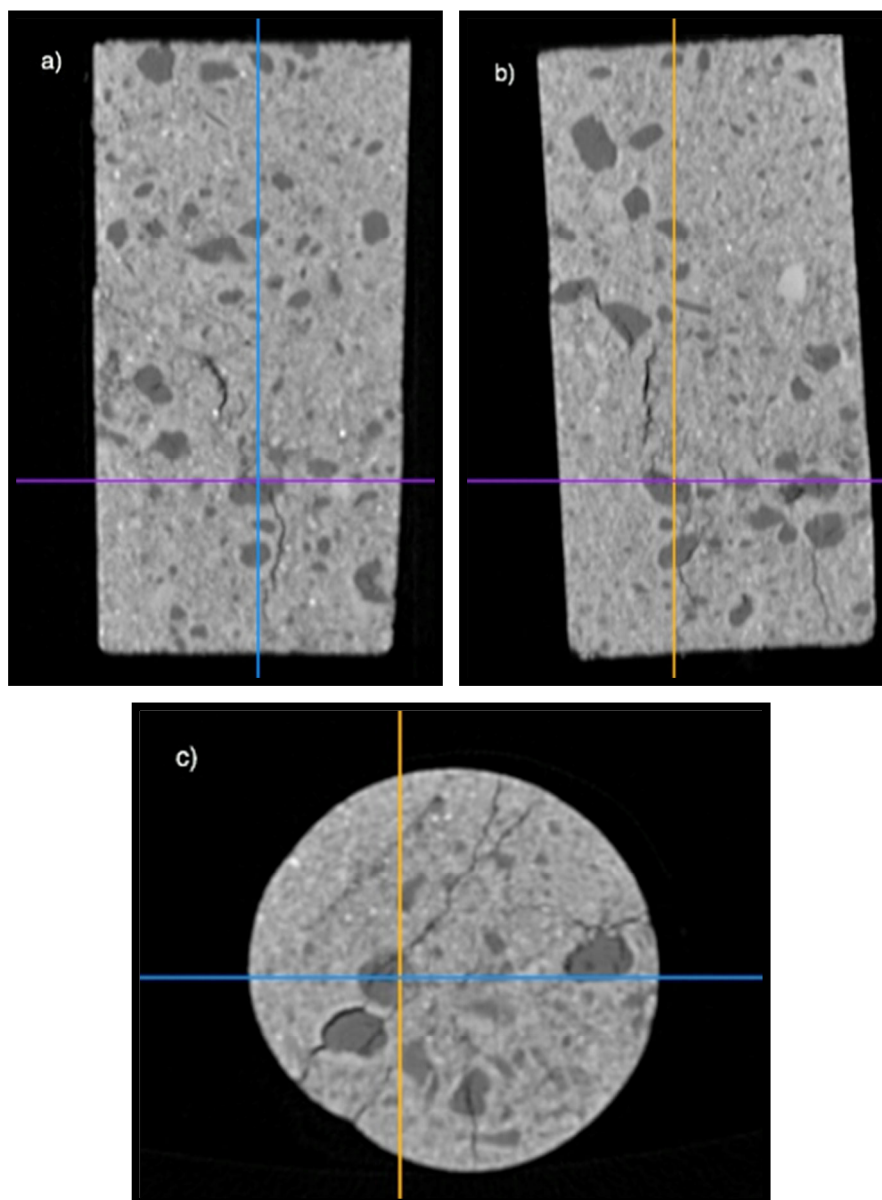


Rys. 57. Analiza wybranych przekrojów poprzecznych kompozytu K3

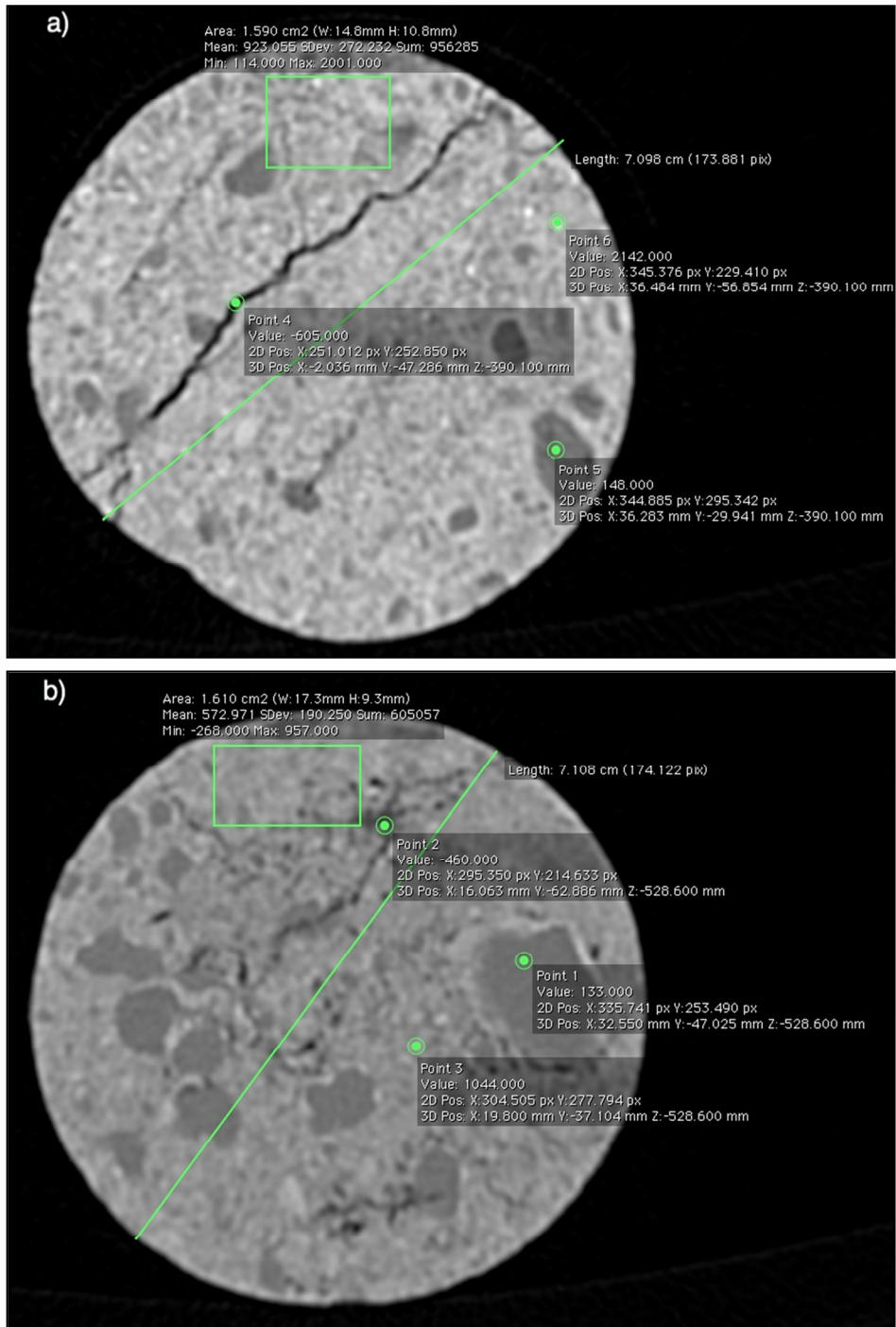
Dalsza analiza za pomocą odpowiedniego oprogramowania pozwala na dokładne umiejscowienie wybranego punktu np. organicznego agregatu w przestrzeni, to znaczy we wzajemnie prostopadłych przekrojach podłużnych – rysunek 58a i 58b oraz odpowiadającego im przekroju poprzecznego – rysunek 58c. Pozwala to na bardzo dokładne prześledzenie, w zależności od ustawionej grubości przekroju, praktycznie każdego osłabienia kompozytu. Możliwe jest również bardzo dokładne określenia kąta ścięcia badanej próbki.

Interesujące ze względów inżynierskich jest również użycie funkcji związanych z polami zainteresowań ROI (z ang. *Region of Interest*). Pozwalają one w wybranym przekroju określić wiele ważnych cech, takich jak: wyznaczenie współczynników absorpcji punktu oraz zaznaczonego, dowolnego obszaru. Możliwe jest także powiększenie wybranego obszaru, jego zwiarytowanie,

a także wiele innych możliwości. Poniżej, porównano ze sobą przykładowe przekroje kompozytu K3 – rysunek 59a i z K19 – rysunek 59b.



Rys. 58. Przestrzenna analiza wybranego punktu kompozytu: a), b) przekroje podłużne, c) przekrój poprzeczny.



Rys. 59. Zastosowanie funkcji ROI do analizy przykładowych przekrojów: a) kompozytu K3, b) kompozytu K19

Analiza zdjęć pozwala stwierdzić znacznie wyższą gęstość kompozytu K3 (im większa wartość pochłaniania promieniowania, tym jaśniejsze zabarwienie w skali szarości). Widoczna jest także znacznie większa porowatość kompozytu K19 w porównaniu do K3. Analiza wybranych obszarów prostokątnych ROI (oznaczone jako *Area*) pokazuje średnią liczbę HU dla K1 (ok. +923) prawie dwukrotnie wyższą od K19 (ok. +572), co jest zgodne z oczekiwaniami. Znacznie wyższa maksymalna wartość liczby HU (ok. +2001) w kompozycie K19 związana jest z występowaniem ziaren piasku kwarcowego. Wszelkie pory, pęknięcia wypełnione powietrzem powinny mieć ujemną wartość w skali HU, na przykład punkt 4 na rysunku 59a czy punkt 2 na rysunku 59b. Substancja organiczna przyjmuje znacznie niższe wartości na analizowanych przekrojach od +133 dla K3 do +148 dla K19 w skali HU.

4.5. ANALIZA MIKROSTRUKTURY KOMPOZYTU ZA POMOCĄ ELEKTRONOWEGO MIKROSKOPU SKANINGOWEGO (SEM)

4.5.1. Wprowadzenie

Elektronowy mikroskop skaningowy SEM (z ang. *Scanning Electron Microscope*) jest odmianą mikroskopu elektronowego. W urządzeniu tym, w momencie badania, analizie poddany jest znacznie mniejszy obszar niż w zwykłym mikroskopie elektronowym. Strumień ukierunkowanych elektronów, skupionych w mały punkt o średnicy przekroju kilkudziesięciu nm, skanuje linię po linii określony obszar obserwowanego preparatu. Pozwala to na obserwację struktur w powiększeniu niedostępnym dla konwencjonalnych mikroskopów optycznych. Wysoka zdolność rozdzielcza pozwala na jakościową, jak i ilościową analizę mikrostruktury przy użyciu odpowiedniego oprogramowania. Dodatkowo dzięki wyposażeniu w detektory promieniowania rentgenowskiego możliwe jest określenie składu chemicznego analizowanego fragmentu próbki [33]. Dzięki tym cechom, urządzenie to znalazło zastosowanie w przemyśle oraz wielu dziedzinach nauki w tym w geotechnice i geologii inżynierskiej. Badania mikrostruktur gruntów w Polsce są powszechnie stosowane od blisko 40 lat. Do ważniejszych należą prace Grabowskiej-Olszewskiej [66], Kumora [78], Kaczyńskiego, czy Trzecińskiego [72].

Badania z zastosowaniem elektronowego mikroskopu skaningowego (SEM) z powodzeniem mogą być stosowane w geotechnice do badań kompozytów gruntowych. Pozwalają one między innymi określić: mechanizm zniszczenia w próbkach poddanych badaniom mechanicznym, zmiany zachodzące w mikrostrukturze w wyniku zastosowania określonego stabilizatora, a także umożliwiają powiązanie mikrostruktury kompozytu z jego właściwościami fizycznymi i mechanicznymi. Badania te są doskonałym uzupełnieniem badań niszczących projektowanych mieszanek gruntowych.

4.5.2. Opis aparatury i stanowiska pomiarowego

Badania w technologii SEM przeprowadzone zostały w Międzyinstytutowym Laboratorium Badań Właściwości i Mikrostruktur Geomateriałów w Pracowni Mikroskopii Skaningowej i Mikroanalizy (*Scanning Electron Microscope and Microanalysis Laboratory*) Zakładu Geologii Inżynierskiej Wydziału Geologii Uniwersytetu Warszawskiego. Do tego celu wykorzystano skaningowy mikroskop elektronowy firmy JOEL (rys. 60), typ JSM-6380 LA sprzężony z mikrosondą elektronową EDS (z ang. *Energy Dispersion Spectroscopy*).



Rys. 60. Skaningowy mikroskop elektronowy firmy JOEL, typ JSM-6380 LA sprzężony z mikrosondą elektronową EDS

Mikroskop obsługiwany był przez mgr Marka Wróbla, natomiast preparacją próbek i wsparciem merytorycznym przy interpretacji zdjęć zajmował się dr Jerzy Trzciński. Wybrane parametry urządzenia [120]:

- badania w świetle elektronów wtórnych SEI (z ang. *Secondary Electron Image*) z rozdzielczością 3 nm,

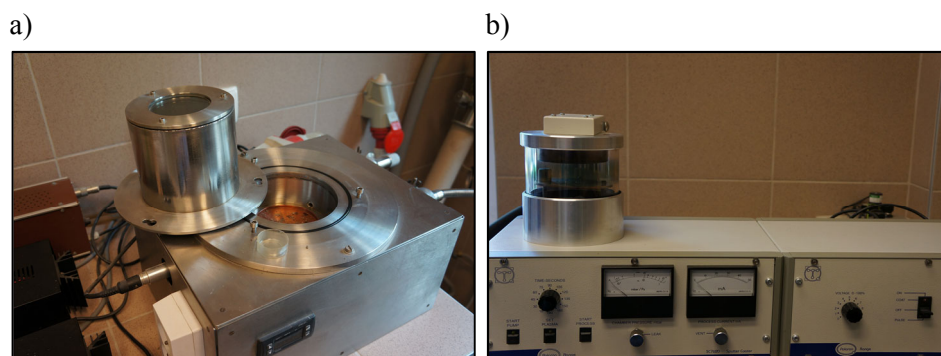
- badania w świetle elektronów odbitych BEI (z ang. *Backscattered Electron Image*) z rozdzielczością 4 nm,
- rejestracja obrazów w wysokiej rozdzielczości, maksymalnie 2560x1920,
- jakościowa analiza składu pierwiastkowego w mikroobszarze za pomocą mikroanalizatora rentgenowskiego EDS w zakresie od boru do uranu,
- ilościowa analiza składu pierwiastkowego metodą bezwzorcową,
- badanie rozkładu pierwiastków wzdłuż linii (linescan) oraz na wybranym obszarze (mapping),
- możliwość badania preparatów w niskiej próżni (tzw. technika low vacuum) bez uprzedniego ich napyłania, z rozdzielczością sygnału BEI 4 nm,
- zakres stosowanych powiększeń od 8x do 300000x.

4.5.3. Przygotowanie próbek do badań

Bardzo istotną częścią wiarygodnej analizy mikrostrukturalnej jest prawidłowe pobranie i przygotowanie preparatu. Miejsce i sposób pobrania jest ściśle związane z celem naukowo-badawczym, natomiast o metodzie przygotowania próbek przede wszystkim decyduje jego wilgotność, stan i stopień konsolidacji [46].

Preparatyka próbek do badań mikrostrukturalnych za pomocą SEM wymusza ich suszenie. Struktura kompozytu gruntowego na bazie torfu wzmocnianego cementem wymusza zastosowanie specjalnych metod. Wysoka wilgotność gruntu i możliwość skurczu próbki uniemożliwia suszenie na powietrzu lub w suszarce. Najmniejsze zmiany objętościowe w strukturze zapewnia metoda suszenia niskotemperaturowego przez sublimację w próżni. Poniżej przedstawiono zastosowaną preparatykę próbek do analizy mikrostrukturalnej [46]:

- próbki kompozytu pobrano o nienaruszonej strukturze (po określonym czasie dojrzewania),
- wycięto próbki o wymiarach nieprzekraczających 10x10 mm i wysokości od 5 do 7 mm,
- przygotowane próbki zamrożono w izopentanie (2-metylobutanie) – inercyjnej (bezwładnej) cieczy ułatwiającej szybkie zamrożenie (zapobiega tworzeniu się wokół próbki izolacyjnej otoczki gazowej) ,
- próbki dalej zamrażano w ciekłym azocie o temperaturze wrzenia $t_w = -196^\circ\text{C}$,
- próbki umieszczono w komorze próżniowej w stałej temperaturze poniżej -40°C , przy stałym ciśnieniu na 20 godzin (rys. 61a),
- próbki przyklejono do metalowych płytek (stolików obserwacyjnych) za pomocą przewodzącej pasty srebrowej (rys. 62),
- boczne powierzchnie próbek pokryto pastą srebrową w celu lepszego przewodnictwa elektrycznego,
- próbki napyłono wysokoprzewodzącą elektrycznie warstwą złotą (rys. 61b) o grubości do 20 nm (tylko w przypadku przygotowania próbek do badania w świetle elektronów wtórnych SEI).



Rys. 61. Urządzenia wykorzystane w preparatyce próbek: a) komora próżniowa, b) napyłarka próżniowa



Rys. 62. Napyłone złotem próbki kompozytu przygotowane do badań w świetle elektronów wtórnych SEI

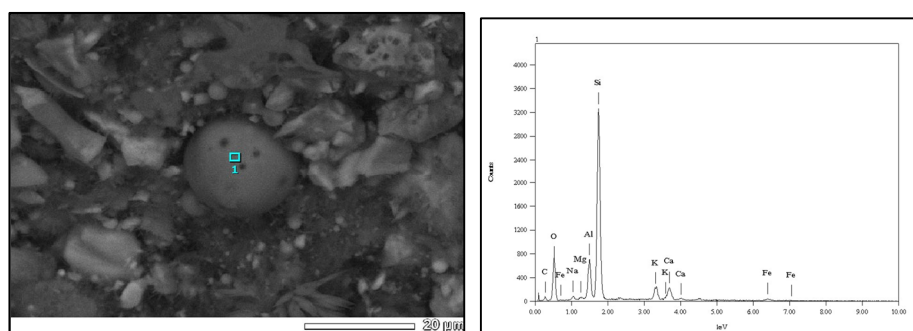
W celu poznania zmian w mikrostrukturze i reakcji danego kompozytu na dodane spoiwo wykonano zdjęcia kompozytów K3, K6, K8, K10, K13 i K18 po 28 dniach dojrzewania. Analizie poddano również zniszczone próbki kompozytów K3 i K19 po 60 dniach dojrzewania, tych samych których użyto do badań tomograficznych.

Mikrostruktury wszystkich badanych kompozytów w świetle elektronów wtórnych SEI zamieszczono w załączniku 3.

4.5.4. Wyniki i analiza badań

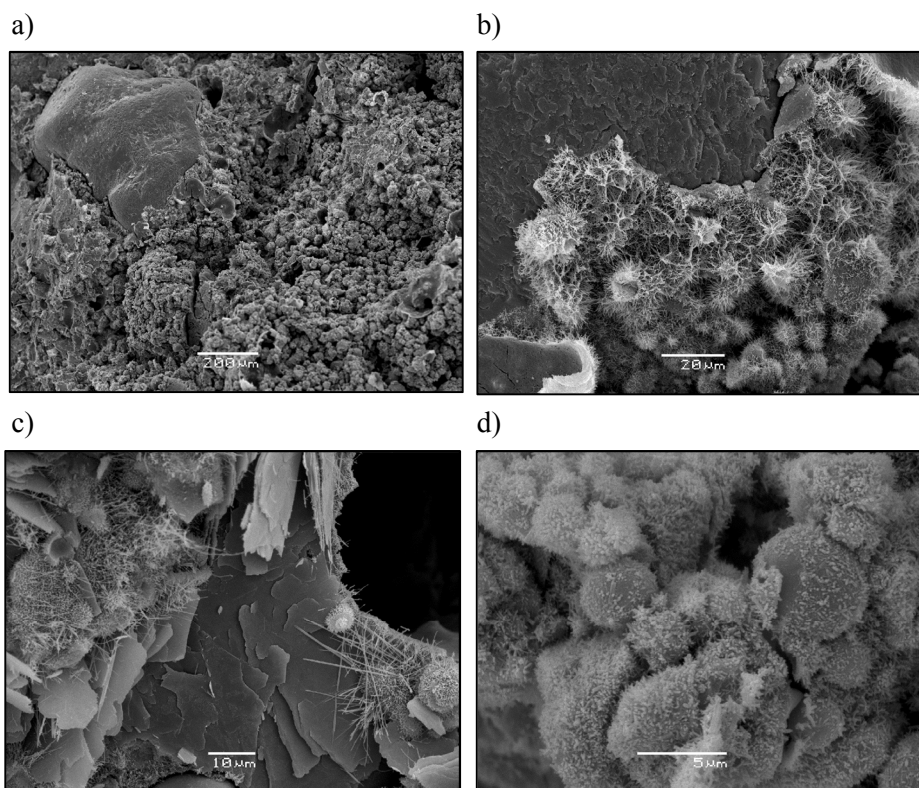
Analiza polegała przede wszystkim na ocenie mikrostruktury kompozytów różniących się zawartością substancji organicznej I_{om} stosunkiem m_c/m_s . W przypadku kompozytów K3 i K19 prześlędzono również pęknięcia powstałe w wyniku badań wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie. Szczególnie pomocne podczas rozpoznawania głównych składników procesu wiązania zaczynu cementowego były prace: [59-63, 84].

Jako spoiwo w kompozytach gruntowych zastosowano cement CEM II/B-V 32,5R. Ze względu na fakt, że jest to cement portlandzki popiołowy zaobserwowano kuliste formy popiołów lotnych. Za pomocą mikrosondy EDS przeprowadzono analizę składu chemicznego i na tej podstawie wywnioskowano, że są to składniki popiołów krzemianowo-glinianowych. Wyniki analizy przedstawiono na rysunku 63. Oprócz popiołów, widoczne są wyraźne, ostrokrawędziste ziarna cementu.



Rys. 63. Mikrostruktura kompozytu K3 w świetle elektronów odbitych BEI oraz analiza składu chemicznego za pomocą mikrosondy EDS, powiększenie 1500x

Najmocniejszy z obserwowanych kompozytów K3 miał zawartość substancji organicznej $I_{om} = 20\%$ i stosunek $m_c/m_s = 1,75$. Analiza mikrostruktury w małym powiększeniu pokazuje na rysunku 64a szczelną i równomierną strukturę kompozytu. Wysoka zawartość cementu, piasku kwarcowego oraz 28 dni dojrzewania umożliwiły rozwój składników charakterystycznych dla procesu wiązania zaczynu cementowego. Na rysunku 64a i 64b widoczne jest ziarno kwarcu obrośnięte igiełkową postacią etryngitu. Etryngit jest jedną z faz uwodnionego glinianu wapnia, zwany trójsiarczanem (Aft). Jego obecność świadczy o zapoczątkowaniu i postępowaniu hydratacji cementu. Związek ten widoczny jest również na rysunku 64c. Przy powiększeniu 5000x można zauważyć najważniejszy, a zarazem główny produkty hydratacji cementu portlandzkiego – fazę CSH w postaci włóknistych kryształów pokrywających składniki kompozytu.

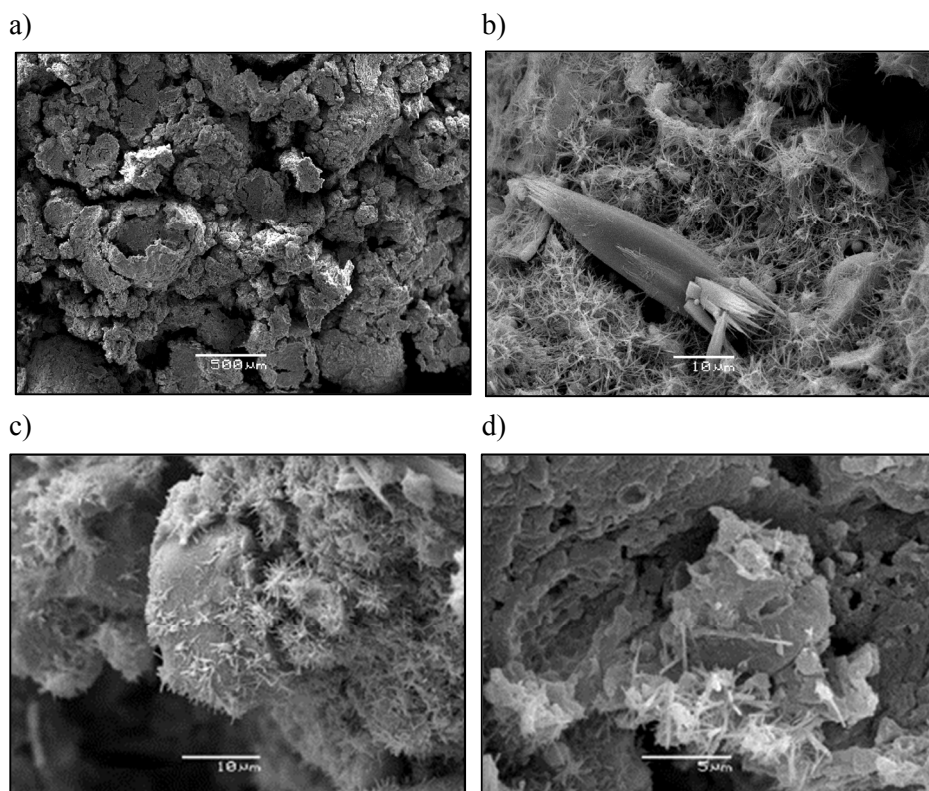


Rys. 64. Mikrostruktura kompozytu K3 w świetle elektronów wtórnych SEI: a) powiększenie 85x, b) powiększenie 900x, c) powiększenie 1300x, d) powiększenie 5000x

W przypadku kompozytów o wyższej zawartości substancji organicznej I_{om} i mniejszej zawartości cementu struktura kompozytu jest zdecydowanie bardziej porowata. Na rysunku 65a przedstawiona jest w niewielkim powiększeniu struktura kompozytu K18 o naturalnej zawartości substancji organicznej $I_{om} = 83,64$ (84,44)%. Mimo obecności wypełniających wolne przestrzenie kryształów etryngitu pokazanych na rysunku 65b kompozyt K18 ma zdecydowanie mniej rozwiniętą fazę CSH widoczną na rysunkach 65c i 65d. Jest to szczególnie widoczne na rysunku 65d, na którym w przewodzie występuje substancja organiczna.

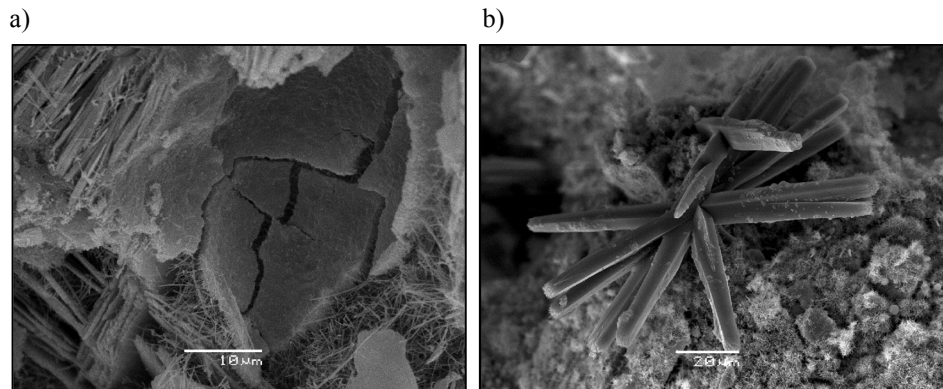
Obecność w mikrostrukturach poszczególnych kompozytach składników charakterystycznych dla procesu wiązania zaczynu cementowego ma wpływ na końcową strukturę kompozytu i tym samym jego parametry mechaniczne. Związki takie jak etryngit czy faza CSH wypełniają wolne przestrzenie wcześniej wypełnione przez wodę porową, skutecznie zwiększając wytrzymałość kompozytów oraz zmniejszając ich odkształcalność. Oprócz wyżej wymienionych składników hydratacji cementu, dodatkowo zaobserwowano portlandyt,

czyli wodorotlenek wapnia (CH) – rysunek 66a oraz węglan wapnia – rysunek 66b między innymi. Portlandyt w zaczynie cementowym zwykle gromadzi się w pewnej odległości od cementu, w pustkach wypełnionych wodą, a przede wszystkim na styku z kruszywem. Na rysunku 66a portlandyt występuje na styku z organicznym składnikiem kompozytu.

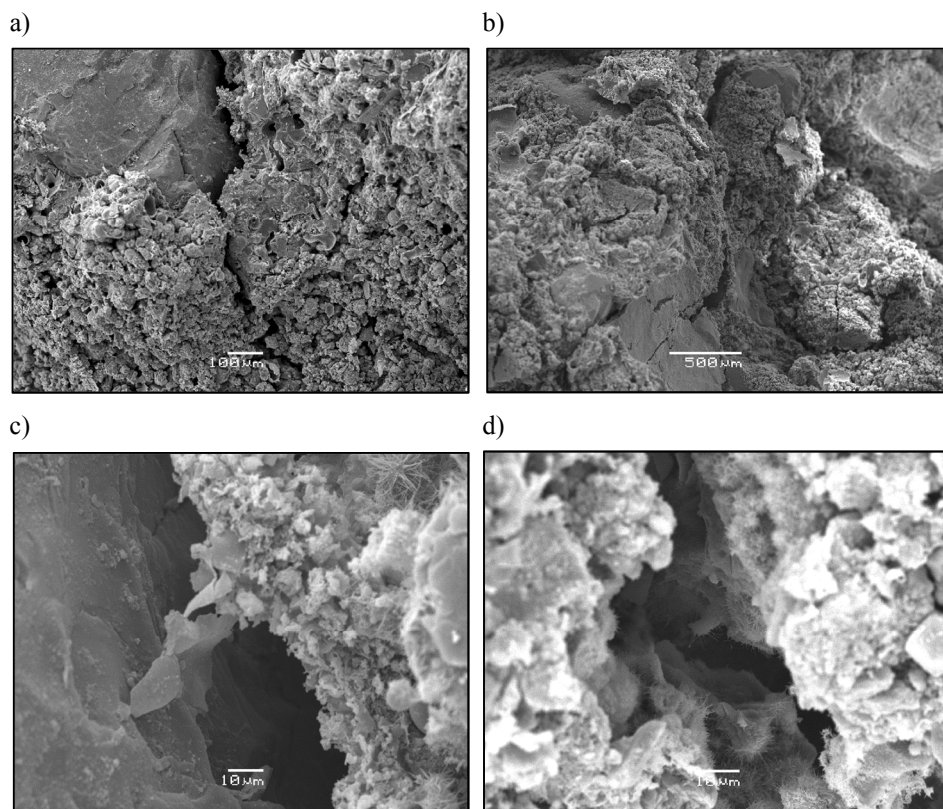


Rys. 65. Mikrostruktura kompozytu K18 w świetle elektronów wtórnych SEI: a) powiększenie 40x, b) powiększenie 1700x, c) powiększenie 2200x, d) powiększenie 5000x

W przypadku kompozytów K3 i K19 analizie poddano nieciągłości powstałe podczas badań wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie. W tym celu pobrano próbki dokładnie w miejscach pęknięć powstałych podczas zniszczenia próbek. Na rysunku 67a i 67b przedstawiono w małym powiększeniu pęknięcie zaobserwowane w kompozycie K3 biegnące wzdłuż ziarna kwarcu oraz przez fragment substancji organicznej. Następnie na rysunkach 67c, 67d przedstawiono powiększenia charakterystycznych obszarów mogących przybliżyć proces zniszczenia.

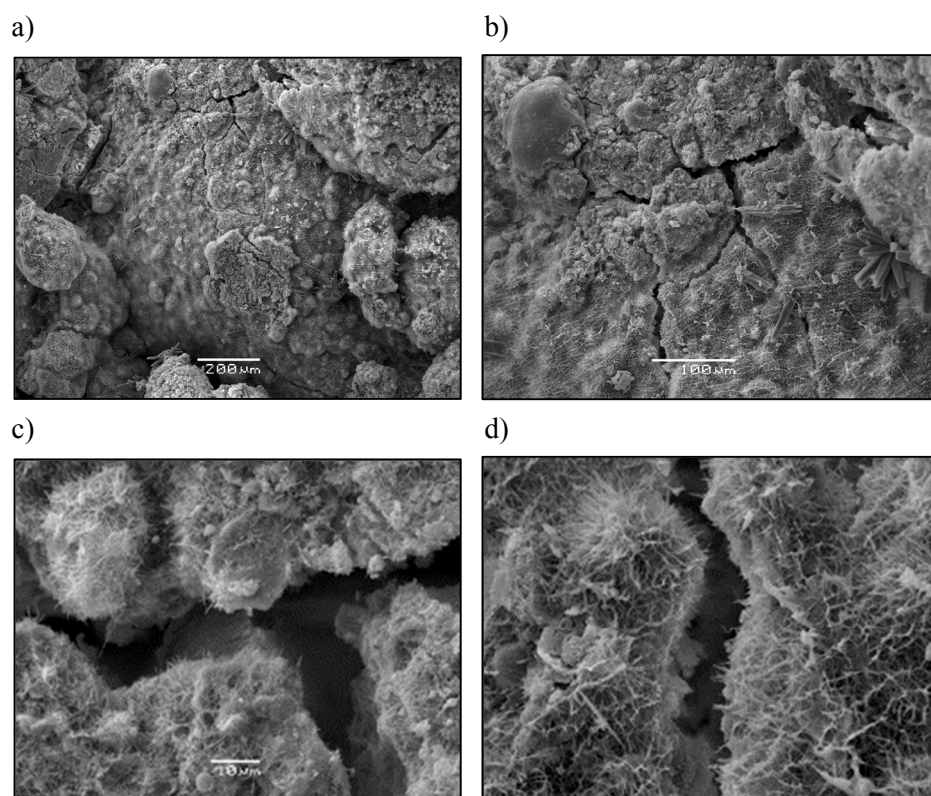


Rys. 66. Charakterystyczne związki zaobserwowane w świetle elektronów wtórnych SEI: a) portlandyt, kompozyt K10, powiększenie 2200x, b) węglan wapnia, kompozyt K19 powiększenie 850x



Rys. 67. Mikrostruktura zniszczonego kompozytu K3 w świetle elektronów wtórnych SEI: a) powiększenie 100x, b) powiększenie 40x, c) powiększenie 1000x, d) powiększenie 1000x

Na rysunku 68b przedstawiono pęknięcie na styku z ziarnem kwarcu, a na rysunku 68c pęknięcie w strukturze stwardniałego kompozytu. Podobną analizę wykonano dla kompozytu K19. Rysunek 68a przedstawia w pęknięcie w niewielkim powiększeniu, natomiast ryciny 68b, 68c miejsca charakterystyczne.



Rys. 68. Mikrostruktura zniszczonego kompozytu K19 w świetle elektronów wtórnych SEI: a) powiększenie 90x, b) powiększenie 230x, c) powiększenie 1400x, d) powiększenie 1400x

W przypadku obu kompozytów K3 i K19, utrwalone na rysunkach 67 i 68 pęknięcia z dużym prawdopodobieństwem powstały podczas badań niszczących ze względu na to, że na ich krawędziach nie występują składniki charakterystyczne dla stwardniałego zaczynu, to znaczy fazy CSH czy etryngitu.

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

5.1. PODSUMOWANIE

Do udowodnienia przyjętej tezy pracy, że: istnieje związek fizyczny pomiędzy właściwościami geotechnicznymi składników, a parametrem wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie kompozytu grunt organiczny-spoivo cementowe, przeprowadzono założone analizy laboratoryjne. Badania objęły 20 różnych receptur kompozytu oznaczonych jako K1-K20, których zmiennymi niezależnymi były: zawartość substancji organicznej I_{om} i stosunek dodawanego cementu do suchej masy gruntu m_c/m_s . Obszar badawczy obejmował zawartość substancji organicznych I_{om} zawartych od 20 do 83,64 (84,40)% oraz m_c/m_s od 0,75 do 2,75. Badaniom wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie wraz z testami sprawdzającymi poddano łącznie ponad 150 próbek sześciennych i 150 próbek cylindrycznych po 7 i 28 dniach dojrzewania. Przeprowadzono pełne badania identyfikacyjne właściwości fizykochemicznych materiału badawczego tj. odczynu pH, składu chemicznego, a także zmian makro- i mikrostruktury. Pozwoliły one na poznanie i ustalenie mechanizmów wzmocnienia, trwałości materiałów oraz przyczyn zniszczenia analizowanych kompozytów.

Określenie zawartości składników organicznych kompozytu oznaczono dla podstawowego składnika kompozytu – torfu oraz kompozytów K16, K18, K20 o naturalnej zawartości substancji organicznej (bez dodatku piasku kwarcowego) i $m_c/m_s = 0,75, 1,75, 2,75$. Ponadto w celach poglądowych włączono do analizy kompozyt K2 o obniżonej zawartości substancji organicznej równej $I_{om} = 20\%$ przy wartości $m_c/m_s = 1,25$.

Badania makrostruktury kompozytów przeprowadzono za pomocą oryginalnej, niestosowanej powszechnie w geotechnice metody – tomografu komputerowego (TK). Analizy wykonano dla zniszczonych próbek o skrajnie różnej zawartości substancji organicznej tj. kompozytu K3 o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 20\%$ i $m_c/m_s = 1,75$ oraz kompozytu K19 o naturalnej zawartości substancji organicznej oraz charakteryzującej się stosunkiem $m_c/m_s = 2,25$.

Badania mikrostruktury kompozytów za pomocą mikroskopu skaningowego (SEM) wykonano przekrojowo dla kompozytów K3, K6, K8, K10, K13, K18 o stosunku $m_c/m_s = 0,75, 1,75, 2,75$ i zróżnicowanej zawartości substancji organicznej $I_{om} = 20-83,64 (84,40)\%$ po 28 dniach dojrzewania. Analizie poddano również zniszczone próbki kompozytów K3 i K19 po 60 dniach dojrzewania, tych samych których użyto do badań tomograficznych. Oznaczenie odczynu pH wykonano dla wszystkich receptur kompozytów (K1-K20).

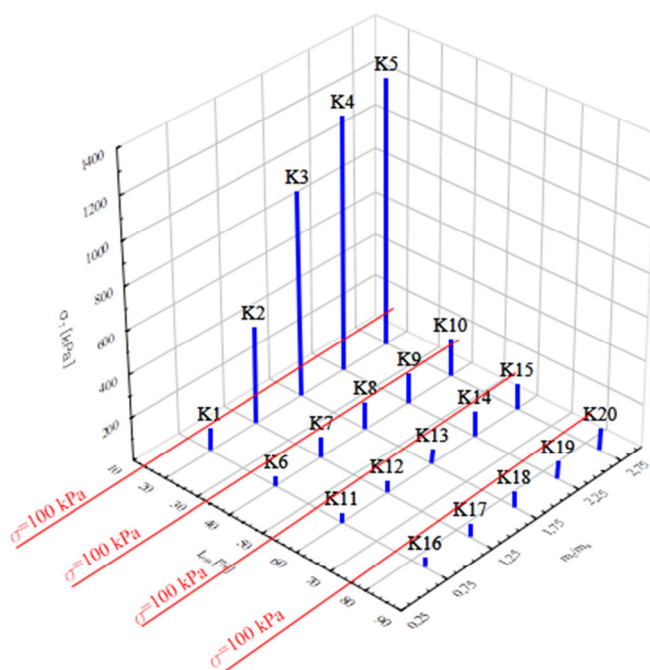
Badania wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie próbek cylindrycznych kompozytów K1-K20 stanowią zasadniczy element rozprawy doktorskiej. Zestawienie otrzymanych wyników badań przedstawiono w tabelach 27 i 28 oraz na rysunkach 69-74. Wytrzymałości kompozytów dla próbek dojrzewających 7 dni wynoszą od 34,10 do 1227,52 kPa, a po 28 dniach dojrzewania uży-

skują relatywnie wyższe wytrzymałości od 45,47 do 1528,71 kPa. Zgodnie z założoną tezą rozprawy doktorskiej wytrzymałość kompozytów na jednoosiowe ściskanie maleje wraz ze wzrostem zawartości substancji organicznej. Otrzymane rezultaty wykazują również, zgodnie z oczekiwaniami, przyrost wytrzymałości wraz ze wzrostem stosunku m_c/m_s .

Tabela 27. Wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie σ_7 (kPa) próbek cylindrycznych kompozytów K1-K20 po 7 dniach dojrzewania

Receptura		Stosunek masy cementu do suchej masy gruntu m_c/m_s				
		0,75	1,25	1,75	2,25	2,75
substancji organicznej I_{om}	20	K1 $\sigma_7: 98,00$	K2 $\sigma_7: 444,03$	K3 $\sigma_7: 939,58$	K4 $\sigma_7: 1169,43$	K5 $\sigma_7: 1227,52$
	40	K6 $\sigma_7: 34,10$	K7 $\sigma_7: 87,39$	K8 $\sigma_7: 120,73$	K9 $\sigma_7: 124,01$	K10 $\sigma_7: 170,24$
	60	K11 $\sigma_7: 35,21$	K12 $\sigma_7: 45,98$	K13 $\sigma_7: 59,36$	K14 $\sigma_7: 109,11$	K15 $\sigma_7: 106,53$
	naturalne	K16 $\sigma_7: 40,41$	K17 $\sigma_7: 54,55$	K18 $\sigma_7: 60,11$	K19 $\sigma_7: 66,17$	K20 $\sigma_7: 91,69$

– kompozyty o wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie $\sigma_7 > 100$ kPa



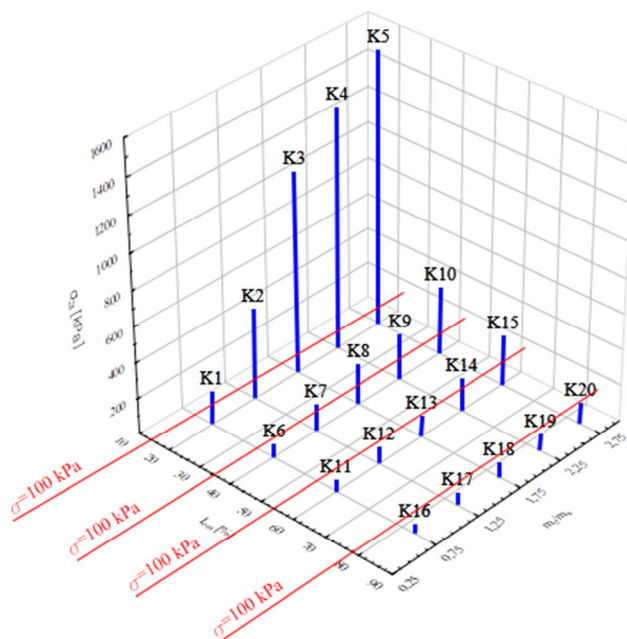
Rys. 69. Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie σ_7 (kPa) próbek cylindrycznych kompozytów K1-K20 po 7 dniach dojrzewania

Kompozyty K1-K5 o najmniejszej zawartości substancji organicznej $I_{om} = 20\%$ po 7 dniach dojrzewania, niezależnie od udziału cementu osiągnęły wartość wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie $\sigma_7 > 100$ kPa, czyli najniższą przeciętną wytrzymałość kompozytów po 28 dniach dojrzewania wykonanych na bazie osadów nawodnionych i gruntów organicznych [98] Z kolei spośród najłabszych mieszanek o naturalnej zawartości substancji organicznej tylko kompozyt K20 ma wytrzymałość zbliżoną do 100 kPa, co jest uzasadnione wyższą zawartością części organicznych.

Tabela. 28. Wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie σ_{28} (kPa) próbek cylindrycznych kompozytów K1-K20 po 28 dniach dojrzewania

Receptura	Stosunek masy cementu do suchej masy gruntu m_c/m_s					
	0,75	1,25	1,75	2,25	2,75	
substancji organicznej I_{om}	20	K1 $\sigma_{28} : 170,49$	K2 $\sigma_{28} : 493,79$	K3 $\sigma_{28} : 1111,34$	K4 $\sigma_{28} : 1334,87$	K5 $\sigma_{28} : 1521,78$
	40	K6 $\sigma_{28} : 61,88$	K7 $\sigma_{28} : 138,92$	K8 $\sigma_{28} : 219,74$	K9 $\sigma_{28} : 239,95$	K10 $\sigma_{28} : 373,82$
	60	K11 $\sigma_{28} : 49,25$	K12 $\sigma_{28} : 83,35$	K13 $\sigma_{28} : 111,14$	K14 $\sigma_{28} : 171,75$	K15 $\sigma_{28} : 266,47$
	naturalne	K16 $\sigma_{28} : 45,47$	K17 $\sigma_{28} : 56,83$	K18 $\sigma_{28} : 66,93$	K19 $\sigma_{28} : 74,51$	K20 $\sigma_{28} : 107,35$

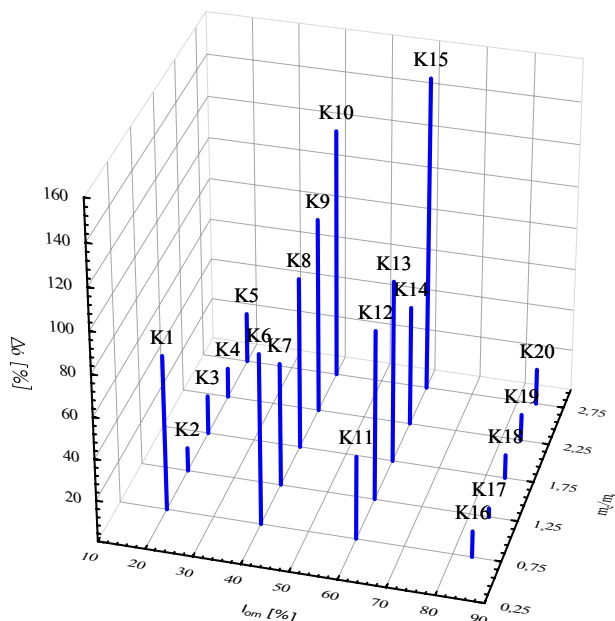
– kompozyty o wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie $\sigma_{28} > 100$ kPa



Rys. 70. Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie próbek cylindrycznych kompozytów K1-K20 po 28 dniach dojrzewania

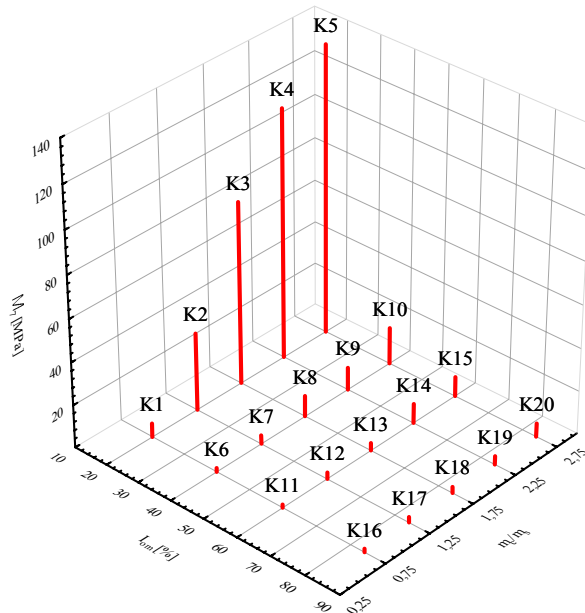
Po 28 dniach dojrzewania kompozyty K1-K5 o najniższej zawartości substancji organicznej $I_{om} = 20\%$, osiągnęły wartość wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie $\sigma_{28} > 100$ kPa. Spośród kompozytów o najwyższym udziale substancji organicznej tylko kompozyt K20 osiągnął wytrzymałość $\sigma_{28} = 107,35 > 100$ kPa.

Po 7 dniach dojrzewania 45%, a po 28 dniach dojrzewania 65% wszystkich kompozytów uzyskało wartość wytrzymałości ponad 100 kPa.

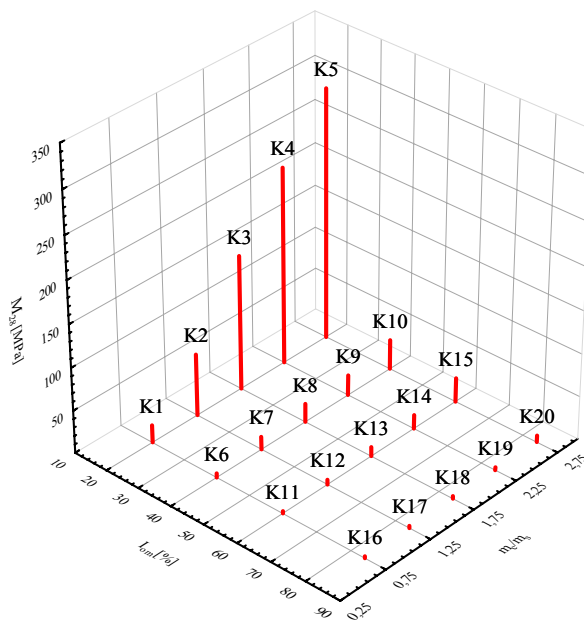


Rys. 71. Przyrost wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie $\Delta\sigma$ (%) próbek cylindrycznych kompozytów K1-K20 po 28 dniach dojrzewania w stosunku do 7 dni

Na podstawie uzyskanych wyników wytrzymałości na ściskanie można wnioskować, że w przypadku kompozytów gruntowych w zagadnieniach praktycznych nie należy kierować się zależnościami stosowanymi dla betonu. Przyrost wytrzymałości mieszanek torf-spoivo cementowe po 28 dniach jest zmienny i zróżnicowany. W przypadku kompozytu K15 wynosi on nawet $\Delta\sigma = 150\%$ w stosunku do wytrzymałości początkowej. Zauważono, że najwyższy względny przyrost zanotowały kompozyty K6-K15 o zawartości substancji organicznej I_{om} równej 40 i 60%.

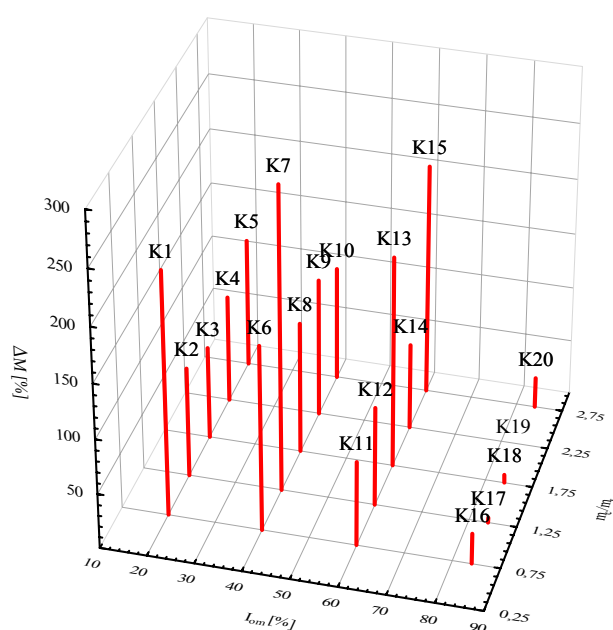


Rys. 72. Moduł odkształcenia M_7 próbek cylindrycznych kompozytów K1-K20 po 7 dniach dojrzewania



Rys. 73. Moduł odkształcenia M_{28} próbek cylindrycznych kompozytów K1-K20 po 28 dniach dojrzewania

Wartości otrzymanych modułów odkształcenia zarówno po 7, jak i 28 dniach dojrzewania są zdecydowanie najwyższe w przypadku kompozytów K1-K5, tzn. charakteryzujących się najniższą zawartością substancji organicznej I_{om} . Związane jest to ze znaczną obecnością wypełniającego pory i przestrzenie szkieletu uformowanego z piasku kwarcowego. W zagadnieniach oceny poprawności współpracy kolumny wzmocnionego podłoża, tak mała odkształcalność nie jest wskazana w przypadku zastosowania materacy geosyntetycznych nadpalowych do bezpiecznej współpracy w metodach wglębnego mieszania gruntów metodą DSM.



Rys. 74. Przyrost modułu odkształcenia ΔM (%) próbek cylindrycznych kompozytu po 28 dniach dojrzewania w stosunku do 7 dni

Przyrost wartości modułów odkształcenia po 28 dniach dojrzewania w stosunku do uzyskanych po 7 dniach jest największy w przypadku kompozytów K6-K15 o zawartości substancji organicznej I_{om} równej 40 i 60%. Przyrost wartości modułu odkształcenia w przypadku kompozytu K15 wynosi nawet około $\Delta M = 210\%$.

Kompozyty o wyższym udziale cementu i niższej zawartości substancji organicznej charakteryzują się proporcjonalnie większym modułem ścisłości. Należy uznać, że nie powinno się sugerować się wartościami wytrzymałości na ścislenie w celu prognozowania proporcjonalnego wzrostu wartości modułów, co jest mylące w doborze składu kompozytu uzyskiwanego za pomocą metody DSM. Przykładowo przyrost wartości modułu ścisłości kompozytu K15 był kilkukrotnie wyższy od wzrostu wytrzymałości na jednoosiowe ścislenie, pod-

czas gdy niewielki wzrost zawartości części organicznych może prowadzić do drastycznych obniżek ścisłości. Jest to niepożądane zjawisko w zagadnieniach praktycznych stabilizacji podłoża.

Otrzymane zależności σ - ε (rys. 31-38) wskazują na pewne prawidłowości pojawiające się dla wszystkich kompozytów. Liniowy wzrost odkształceń występuje do pewnej określonej wartości naprężenia, która zależy przede wszystkim od udziału cementu, zawartości substancji organicznej i czasu dojrzewania. Po przekroczeniu tej wartości naprężenia ściskającego wykres ulega zakrzywieniu, wykazując wyraźną nieliniowość. Najkrótszym zakresem liniowych odkształceń (mały zakres sprężystości) charakteryzowały się najsłabsze kompozyty K16-K20, a najdłuższym kompozyty K2-K5 o najwyższym udziale cementu (zachowywały się podobnie jak materiał kruchy).

5.2. WNIOSKI Z BADAŃ

Na podstawie analizy uzyskanych wyników badań zróżnicowanych kompozytów mineralno-organicznych ze spoiwem cementowym sformułowano najważniejsze wnioski:

1. Analiza fizyczna i matematyczna wyników badań wytrzymałości pokazuje, że istnieje ścisły związek fizyczny pomiędzy właściwościami geotechnicznymi składników (zmiennie niezależne I_{om} i m_c/m_s) a parametrem wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie kompozytu torf-spoivo cementowe.
2. Wytrzymałości uzyskiwane w warunkach laboratoryjnych w praktyce nierzadko odbiegają od polowych. Przeprowadzone doświadczenia pozwalają zaprojektować geokompozyt o żądanych właściwościach geoinżynierskich tzn. rodzaj, ilość i proporcje poszczególnych spoiw i zweryfikować, czy stosunek w/c jest właściwy do oczekiwanego efektu wzmocnienia podłoża.
3. Poszukiwania wykazały, że istnieje obszar o korzystnych warunkach nośności przy odpowiednim udziale i stosunku spoiwa cementowego do pozostałych składników kompozytu. Przyjmując do zagadnień praktycznych jako kryterium minimalną wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie równą $\sigma_{28} = 100$ kPa, założone kryterium ekonomiczności, techniczne ograniczenia metody wgłębnego mieszania, a także biorąc pod uwagę zaobserwowany wzrost modułu odkształcenia ΔM , za szczególnie korzystne dla potrzeb inżynierskich uważa się kompozyty K8, K9, K10, K14 i K15, a po 28 dniach dojrzewania również kompozyty K7 i K13.
4. Przyjęte w rozprawie i zastosowane w badaniach procedury pozwoliły uzyskać wiarygodne wyniki. Analizy badań wytrzymałości kompozytów na jednoosiowe ściskanie po 7 dniach dojrzewania wykazały dodatnią korelację, $0,98 > r > 0,92$ oraz charakteryzowały się współczynnikiem determinacji $0,96 > r^2 > 0,85$. Świadczy to o silnym liniowym związku między wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie a udziałem cementu oraz wskazuje na poprawność zastosowanej metodyki badań, która może być wykorzystana

w podobnych poszukiwaniach składu o żądanych właściwościach w geoinżynierii materiałowej.

5. Wyniki badań pokazały, że stopień homogenizacji mieszanki kompozytu ma znaczący wpływ na zmienność wyników badań wytrzymałościowych. Praktycznie proces mieszania w warunkach *in situ* nie zapewnia uzyskania pełnej jednorodności masywu gruntu wzmacnianego cementem. W konsekwencji tworzyć się mogą różnej wielkości bryłki torfu o znacznie mniejszej wytrzymałości. Zjawiska te generują samoistne powierzchnie ścinania w tych miejscach osłabienia. Rozkład, nagromadzenie i ułożenie ma charakter losowy, co dowodzą wyniki analiz mikro- i makrostruktury.
6. Prognozowanie skuteczności wzmocnienia lub projektowanie kompozytów o żądanych parametrach tylko na podstawie odczynu pH mieszanki kompozytu jest obarczone dużym ryzykiem technicznym i mało skuteczne dla każdego badanego gruntu. Odczyn pH wszystkich kompozytów był wyższy od 9, zatem powinny one uzyskać oczekiwaną wytrzymałość na ściskanie [101]. Jak dowodzą wyniki badań w rozprawie, prognozy te okazują się błędne (spodziewano się wartości wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie w granicach 100 kPa). Zakres zmienności odczynów pH jest niewielki i wynosi: 11,74-12,48. Oznaczenie to należy stosować z dużą ostrożnością i w przypadku gruntów organicznych używać co najwyżej jako badanie pomocnicze lub wskaźnikowe.
7. Analiza chemiczna składników substancji organicznej pozwala stwierdzić, że zawartość kwasów huminowych maleje, a fulwowych nieznacznie rośnie wraz ze wzrastającą zawartością dodawanego cementu. Po przekroczeniu pewnej granicznej ilości cementu, jego dalsze dodawanie nie wpływa znacząco na obniżenie zawartości kwasów huminowych. Interesującym zjawiskiem jest wzrastająca zawartość kwasów fulwowych wraz ze wzrostem ilości dodawanego cementu, co wymagać będzie dalszych prac identyfikacyjnych w przyszłości. Nie wyklucza się możliwego błędu metody.
8. W przypadku projektowania w inżynierii geotechnicznej wytrzymałości nowych kompozytów gruntowych prognozowanie wytrzymałości na podstawie zmian w mikrostrukturze niesie za sobą informację, ale i pewne zagrożenie. Analiza za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) obejmuje bowiem bardzo mały obszar – wymusza to konstrukcja urządzenia. Proces mieszania nie zapewnia całkowitej jednorodności wzmacnianego gruntu z cementem. Tworzą się różnej wielkości niejednorodności wytrzymałości kompozytu w skali mikro. Nawet w zdecydowanie bardziej homogenicznym betonie [62] występują strefy o różnej gęstości i porowatości. Zatem badania mikrostruktur powinny służyć wyłącznie uściśleniu i potwierdzeniu, a nie prognozowaniu wartości liczbowej wytrzymałości.
9. Zachowanie się kompozytów gruntowych pod obciążeniem zależy od ich budowy wewnętrznej. Za pomocą tomografii komputerowej (TK) możliwe było poznanie przestrzennego ułożenia poszczególnych składników kompozytu w skali makro. Dzięki temu można w przyszłości określić wiele istotnych

cech, dzisiaj niedostępnych dla badaczy. Doskonale widoczne i zdefiniowane są między innymi: stopień homogenizacji, porowatość, a nawet gęstość, a więc właściwości fizyczne które mają bezpośredni wpływ na kształtowanie własności mechanicznych zaprojektowanego kompozytu. Analiza tomograficzna próbek zniszczonych w klasycznych próbach wytrzymałościowych potwierdziła wielopłaszczyznowy model zniszczenia w strefach koncentracji części organicznych kompozytu.

10. Przeprowadzone badania potwierdzają wyjątkową przydatność stosowania medycznych rentgenowskich tomografów komputerowych do celów inżynierskich, w tym również do badań geokompozytów. Przeprowadzone doświadczenia miały charakter wprowadzający i stanowią wstęp do rozwoju dalszych i dokładniejszych badań z wykorzystaniem przedstawionych technologii.

5.3. KIERUNEK DALSZYCH BADAŃ

Najistotniejsze kierunki przyszłych badań:

1. Rozszerzenie zastosowania tomografii komputerowej (TK) w geotechnice, w tym również do badań geokompozytów. Technologia ta umożliwia dynamiczne, szybkie i nieniszczące analizy cech takich jak: stopień homogenizacji, porowatość, a nawet określić kąt powierzchni ścinania próbek, a ponadto pozwala na poznanie mechanizmów zniszczenia próbek.
2. Koniecznym jest określenie zakresu sprężystego odkształcenia próbek w funkcji udziału części organicznych po okresie dłuższym niż 28 dni. Planuje się przeprowadzenie badań cyklicznego ściskania i odciążania próbek do typowych wymuszeń dynamicznych podłoża drogowego o ruchu ciężkim. Pozwoli to na ustalenie mechanizmu zniszczenia próbek kompozytów o różnej zawartości substancji organicznej i udziale cementu w strefach stabilizacji dróg i autostrad.
3. Celowym jest opracowanie standardowego sposobu przygotowania i standaryzacji warunków dojrzewania kompozytów gruntowych. Wyniki badań wskazują na istotny wpływ środowiska dojrzewania próbek, sposobu obciążenia, mieszania i obrazu ich niejednorodności w objętości na końcową wytrzymałość kompozytu.

LITERATURA

KSIĄŻKI, SKRYPTY

- [1] Bartkowiak T., 1970. Wielkopolska i środkowe nadodrze. Państwowe Wydawnictwa Naukowe Warszawa.
- [2] Beale S., Todd C., 2011. Tomografia komputerowa. Rozdział 17 w książce Radiografia. Podręcznik dla techników elektroradiografii, Easton S. (red.). Wydawnictwo Elsevier Urban & Partner Wrocław, 221- 229.
- [3] Benjamin J.R., Cornell C.A., 1977. Rachunek prawdopodobieństwa statystyka matematyczna i teoria decyzji dla inżynierów. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne Warszawa.
- [4] Bolewski A., 1994. Encyklopedia surowców mineralnych. Centrum Podstawowych Problemów Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią. Polska Akademia Nauk Komitet Gospodarki Surowcami Mineralnymi Kraków.
- [5] Brandyk T., Gnatowski T., Oleszczuk R., Szatyłowicz J., Szejba D., 2007. Postęp w badaniach właściwości fizycznych gleb torfowo-murszowych, Rozdział w książce Torfowiska i mokradła, Biernacka E. (red.). Wydawnictwo Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego Warszawa.
- [6] Bzówka J., Juzwa A., Knapik K., Stelmach K., 2012. Geotechnika komunikacyjna. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej Gliwice.
- [7] Chmielewski L., Kulikowski J.L., Nowakowski A., 2003. Obrazowanie biomedyczne. Akademicka Oficyna Wydawnicza Exit Warszawa.
- [8] Cierniak R., 2005. Tomografia komputerowa. Budowa urządzeń CT. Algorytmy rekonstrukcyjne. Akademicka Oficyna Wydawnicza Exit Warszawa.
- [9] Czarnecki L., Broniewski T., Henning O., 1996. Chemia w budownictwie. Wydawnictwo Arkady Warszawa.
- [10] De Feyter P.J., Achenbach S., 2006. Tomografia komputerowa, Rozdział 4 w książce Choroby serca i naczyń. Tom I, Camm A.J., Luscher T.F., Serruys P.W. (red.). Termedia Wydawnictwo Medyczne Poznań, 119-143.
- [11] Dembek W., Piórkowski H., 2007. Mokradła w krajobrazie Polski. Rozdział w książce Torfowiska i mokradła, Biernacka E. (red.). Wydawnictwo Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego Warszawa.
- [12] Dobrzański B., Zawadzki S., 1995. Gleboznawstwo. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne Warszawa.
- [13] Dondalewski H., Januszewski M., 2008. Betony cementowe. Zagadnienia wybrane. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne Warszawa.
- [14] Głazewski M., Nowocień E., Piechowicz K., 2010. Roboty ziemne i rekultywacyjne w budownictwie komunikacyjnym. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności Warszawa.
- [15] Grabowska-Olszewska B., Siergiejew J.M., 1977. Gruntoznawstwo. Wydawnictwa Geologiczne Warszawa.

- [16] Grabowska-Olszewska B., 1990. Metody badań gruntów spoistych. Wydawnictwa Geologiczne Warszawa.
- [17] Gwizdała K., 2010. Fundamenty Palowe. Technologie i obliczenia. Wydawnictwo Naukowe PWN Warszawa.
- [18] Hansbo S., 2004. Band drains. Rozdział 1 w książce Ground Improvement, Moseley M.P., Kirch K. (red.). Spon Press Londyn i Nowy Jork.
- [19] Ilnicki P., 2002. Torfowiska i Torf. Wydawnictwo Akademii Rolniczej im. Augusta Cieszkowskiego w Poznaniu Poznań.
- [20] Jamróży Z., 2008. Beton i jego technologie. Wydawnictwo Naukowe PWN Warszawa.
- [21] Jasiczak J., Mikołajczak P., 2003. Technologia betonu modyfikowanego domieszkami i dodatkami. Oficyna Wydawnicza Politechniki Poznańskiej Poznań.
- [22] Jeż J., 2004. Gruntoznawstwo budowlane. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej Poznań.
- [23] Jeż J., 2008. Biogeotechnika. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej Poznań.
- [24] Kondracki J., 1988. Geografia fizyczna Polski. Państwowe Wydawnictwo Naukowe Warszawa.
- [25] Kurdowski W., 2010. Chemia cementu i betonu. Stowarzyszenie Producentów Cementu. Wydawnictwo Naukowe PWN Kraków, Warszawa.
- [26] Kuźnicki F., Białousz S., Skłodowski P., 1979. Podstawy gleboznawstwa z elementami kartografii i ochrony gleb. Państwowe Wydawnictwo Naukowe Warszawa.
- [27] Maksimow A., 1965. Torf i jego użytkowanie w rolnictwie. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne Warszawa.
- [28] Mizerski W., Sylwestrzak H., 2002. Słownik Geologiczny. Wydawnictwo Naukowe PWN Warszawa.
- [29] Moseley M.P., Kirch K., 2004. Ground Improvement. Spon Press Londyn i Nowy Jork.
- [30] Mucha J., 1994. Metody geostatystyczne w dokumentowaniu złóż. Skrypt. Katedra Geologii Kopalnianej AGH Kraków.
- [31] Myślińska E., 2001. Grunty organiczne i laboratoryjne metody ich badania. Wydawnictwo Naukowe PWN Warszawa.
- [32] Myślińska E., 2010. Laboratoryjne badania gruntów i gleb. Wydawnictwo Naukowe PWN Warszawa.
- [33] Oleś A., 1998, Metody doświadczalne fizyki ciała stałego. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne Warszawa.
- [34] Osiecka E., 2005. Materiały budowlane. Spoiwa mineralne i kruszywa. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej Warszawa.
- [35] Ostasiewicz S., Rusnak Z., Siedlecka U., 2001. Statystyka. Elementy teorii i zadania. Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej im. Oskara Langego we Wrocławiu Wrocław.

- [36] Pisarczyk., Rymsza B., 1993. Badania laboratoryjne i polowe gruntów. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej Warszawa.
- [37] Pisarczyk S., 2004. Grunty nasypowe. Właściwości geotechniczne i metody ich badania. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej Warszawa.
- [38] Pisarczyk S., 2005. Geoinżynieria. Metody modyfikacji podłoża gruntowego. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej Warszawa.
- [39] Schnitzer M., Khan S.U., 1978. Soil organic matter. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam The Netherlands.
- [40] Skierucha W.M., 2011. Nondestructive measurements in soil. Rozdział w książce Encyclopedia of Agrophysics, Gliński J., Horabik J., Lipiec J. (red.). Wydawnictwo Springer, Dordrecht The Netherlands. 513-516.
- [41] Sobczyk M., 2007 Statystyka. Wydawnictwo Naukowe PWN Warszawa.
- [42] Sutton B.H.C., 1993. Solving Problems in: Soil Mechanics. Longman Scientific & Technical Essex.
- [43] Taylor J.R., 2006. Mechanika klasyczna. Tom 2. Wydawnictwo Naukowe PWN Warszawa.
- [44] Tobolski K., 2000. Przewodnik do oznaczania torfów i osadów jeziornych. Wydawnictwo Naukowe PWN Warszawa.
- [45] Topolnicki M., 2004. In situ soil mixing. Rozdział 9 w książce Ground Improvement. Moseley M.P., Kirch K. (red.). Spoon Press Londyn i Nowy Jork. 331-428.
- [46] Trzciniński J., 1998. Ilościowa analiza mikrostrukturalna w skaningowym mikroskopie elektronowym (SEM) gruntów poddanych oddziaływaniu wody. Rozdział 7 w książce Geologia stosowana. Właściwości gruntów nienasyconych. Grabowska-Olszewska B. (red.). Wydawnictwo Naukowe PWN Warszawa. 113-150.
- [47] Ugła H., 1983. Gleboznawstwo rolnicze. Państwowe Wydawnictwo Naukowe Warszawa.
- [48] Uniejewska M., Nosek M., 1992. Objasnienia do szczegółowej Mapy Geologicznej Polski – arkusz Łabiszyn (358). Państwowy Instytut Geologiczny Warszawa.
- [49] Wiłun Z., 2005. Zarys Geotechniki. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa.

ARTYKUŁY I ROZPRAWY NAUKOWE

- [50] Åhnberg H., 2006. Strength of stabilised soils. A laboratory study on clays and organic soils stabilised with different types of binder. Doctoral thesis. Swedish Deep Stabilization Research Centre, Report 16 Lund.
- [51] Åhnberg H., 2007. On yield stresses and the influence of curing stresses on stress paths and strength measured in triaxial testing of stabilized soils. Canadian Geotechnical Journal. 44. 54-66.

- [52] Aruntas H.Y., Tekin I., Birgul R., 2010. Determining Hounsfield Unit values of mortar constituents by computerized tomography. *Measurement*. 43. 410-414.
- [53] Axelsson K., Johansson S.E., Andersson R., 2002. Stabilization of Organic Soils by Cement and Pozzolanic Reactions – feasibility study. Swedish Deep Stabilization Research Centre, Report 3 Stockholm.
- [54] Baker S., 2000. Deformation Behaviour of Lime/Cement Column Stabilized Clay. Swedish Deep Stabilization Research Centre, Report 7 Linköping.
- [55] Bastardie F., Capowiez Y., de Dreuzy J.R., Cluzeau D., 2003. X-ray tomographic and hydraulic characterization of burrowing by three earthworm species in repacked soil cores. *Applied Soil Ecology*. 24. 3-16.
- [56] Binder K., 2008. Zastosowanie wymiany dynamicznej do wzmocnienia podłoża obiektów wielkoobszarowych. *Materiały Budowlane*. Warszawa. 2. 33-34.
- [57] Burke G.K., Sehn A.L., 2003. The influence of ground improvement on geotechnical design. *Proceedings of ASCE 20th Central Pennsylvania Geotechnical Conference*, Hershey, PA.
- [58] Chen H., Wang Q., 2006. The behaviour of organic matter in the process of soft soil stabilization using cement. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 65. 445-448.
- [59] Diamond S., 2004. The microstructure of cement paste and concrete – a visual primer. *Cement & Concrete Composites*. 26. 919-933.
- [60] Diamond S., 2005. The patch microstructure in concrete: effect of mixing time. *Cement and Concrete Research*. 35. 1014-1016.
- [61] Diamond S., Kjellsen K.O., 2006. Resolution of fine fibrous C-S-H in backscatter SEM examination. *Cement & Concrete Composites*. 28. 130-132.
- [62] Diamond S., Thaulow N., 2006. The patch microstructure in concrete: Evidence that it exists and is not a backscatter SEM artifact. *Cement & Concrete Composites*. 28. 606-612.
- [63] Diamond S., Landis E., 2007. Microstructural features of a mortar as seen by computed microtomography. *Materials and Structures*. 40. 989-993.
- [64] Filipiak J., 2006. Badania skuteczności ulepszania niektórych organicznych przy użyciu różnych spoiw. *Rozprawa doktorska*, Politechnika Koszalińska, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska Koszalin.
- [65] Gąsiorowski S., 2011. Ulepszanie i stabilizacja gruntów spoiwem wapiennym. *Materiały budowlane*, Warszawa. 4. 64-65.
- [66] Grabowska-Olszewska B., 1975. SEM analysis of microstructures of loess deposits, *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*. No 11, Krefeld, (streszczenie). 45-48.
- [67] Hebib S., Farrell E.R., 2003. Some experiences on the stabilization of Irish peats. *Canadian Geotechnical Journal*. 40. 107-120.

- [68] Heereman D.A., Hopmans J.W., Claustnitzer V., 1997. Three dimensional imaging of plant roots in situ with X- ray computed tomography. *Plant Soil*. 189. 167-179.
- [69] Holm, G., Ruin, M., Håkansson S., 1999. Columns penetration tests and extraction of lime/cement columns. *Proceedings of International Conference on Dry Mix Methods for Deep Stabilization*, Stockholm. 311-314.
- [70] Jarominiak A., Bichajło L., Flota L., Trojnar K., 1999. Odbudowa drogi krajowej nr 4 na odcinku ul. Krakowskiej w Przemysłu zniszczonym wskutek osuwiska. *Drogownictwo*. Warszawa. 9. 267-278.
- [71] Johnson S.N., Read D.B., Gregory P.J., 2004. Tracking larval insect movement within soil using high resolution X-ray microtomography. *Ecological Entomology*. 29. 117-122
- [72] Kaczyński R., Trzcński J., 1997. Ilościowa analiza mikrostrukturalna w skaningowym mikroskopie elektronowym (SEM) typowych gruntów Polski. *Przegląd Geologiczny*. 45 (7). 721-726.
- [73] Kalantari B., Bujang H.B.K., 2009. Load-Bearing Capacity Improvement for Peat Soil. *European Journal of Scientific Research*. 32(2). 252--259.
- [74] Kalantari B., Huat B.B.K., 2010. Improving unconfined compressive strength of peat with cement, polypropylene fibers, and air curing technique. *Global Journal of Researches in Engineering*. 10. 9-15.
- [75] Kalantari B., Prasad A., Huat B.B.K., 2012. Use of cement, polypropylene fibers and optimum moisture content values to strengthen peat. *International Journal of Physical Sciences*. 7(8). 1276-1285.
- [76] Kazemian S., Prasad A., Huat B.B.K., Bolouri Bazaz J., Mohammed T.A., Abdul Aziz F.N., 2011. Effect of aggressive pH media on peat treated by cement and sodium silicate grout. *Journal of Central South University of Technology*. 18. 840-847.
- [77] Kettridge N., Binley A., 2008. X-ray computed tomography of peat soils: measuring gas content and peat structure. *Hydrological Processes*. 22. 4827-4837
- [78] Kumor M.K., 1989. Zmiany mikrostruktury iłów monomineralnych i iłó plioceńskiego pod wpływem cyklicznego przemrażania i odmrażania. *Rozprawa nr 34*, Wydawnictwo uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej Bydgoszcz.
- [79] Leśniewska A., 2007. Wytrzymałościowe i technologiczne aspekty wzmacniania gruntu metodą wglębnego mieszania na mokro. *Rozprawa doktorska*. Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska Gdańsk.
- [80] Moayed H., Huat B.B.K., Kazemian S., Daneshmand S., 2012. Stabilization of organic soil using sodium silicate system grout. *International Journal of Physical Sciences*. 7(9). 1395-1402.
- [81] Myślińska E., 1999. Parametry fizyczne torfów i ocena metod ich oznaczania. *Przegląd Geologiczny* 47(7). Warszawa.

- [82] Najder T., Najder A., 2005. Stabilizacja gruntów spoistych i organicznych metodą kolumn wapienno-cementowych. *Materiały budowlane*. Warszawa. 2. 30-32.
- [83] Ni S.H., Lehmann L., Charng, J.J., Lo K.F., 2006. Low-strain integrity testing of drilled piles with high slenderness ratio. *Computers and geotechnics*. SCI & EI. 33 (6-7). 283-293.
- [84] Nontananandh S., Yoobanpot T., Boonyong S., 2005. Scanning electron microscopic investigations of cement stabilized soil. *Proceedings of the 10th National Convention on Civil Engineering, EIT, Pattaya, Chonburi, Thailand*. 3. 23-26.
- [85] Nunan N., Ritz K., Rivers M., Feeney D.S., Young I.M., 2006. Investigating microbial micro-habitat structure using X-ray computed tomography. *Geoderma*. 133. 398-407.
- [86] Okruszko H., Churski T., 1962. Związek pomiędzy rodzajem torfowiska a geomorfologią terenu na przykładzie doliny Noteci. *Roczniki Nauk Rolniczych*. 75-F-2. 371-392.
- [87] Pastuszko A., 2007. Substancja organiczna w glebach. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*. 30. 83-98.
- [88] Petrovic A.M., Siebert J.E., Rieke P.E., 1982. Soil bulk density analysis in three dimensions by computed tomographic scanning. *Soil Science Society of America Journal*. 46(3). 445-450.
- [89] Post van L., 1922. Sveriges Geologiska Undersöknings torvinventering och några av dess hittills vunna resultat. *Svenska Mosskulturföreningens Tidskrift, Jönköping*. 1-27.
- [90] Pousette K.J., Macsik J., Jacobsson A., 1999. Peat soil samples stabilised in laboratory – Experiences from manufacturing and testing, *Proceedings of the International Conference of Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization*. Rotterdam. 85-92.
- [91] Rezanezhad F., Quinton W.L., Price J.S., Elrick D., Elliot T.R., Heck R.J., 2009. Examining the effect of pore size distribution and shape on flow through unsaturated peat using computed tomography. *Hydrology and Earth System Sciences*. 13. 1993-2002.
- [92] Rezanezhad F., Quinton W.L., Price J.S., Elliot T.R., Elrick D., Shook K.R., 2010. Influence of pore size and geometry on peat unsaturated hydraulic conductivity computed from 3D computed tomography image analysis. *Hydrological Processes*. 24. 2983-2994.
- [93] Roguski W., 1961. Zagospodarowanie łąk w dolinie Kanału Bydgoskiego w świetle badań i doświadczeń przeprowadzonych w latach 1948-1956. *Roczniki Nauk Rolniczych*. 74-F-4. 581-614.
- [94] Schnitzer M., Lowe L.E., Dormaar J.F., Martel Y., 1981. A procedure for the characterization of soil organic matter. *Canadian Journal of Soil Sciences*. 61. 517-519.

- [95] Sleutel S., Cnudde V., Masschaele B., Vlassenbroek J., Dierick M., Van Hoorebeke L., Jacobs P., De Neve S., 2008. Comparison of different nano- and micro-focus X-ray computed tomography set-ups for the visualization of the soil microstructure and soil organic matter. *Computers & Geosciences*. 34. 931-938
- [96] Taina I.A., Heck R.J., Elliot T.R., 2008. Application of X-ray computed tomography to soil science: A literature review. *Canadian Journal of Soil Science*. 88. 1-19
- [97] Terashi M., 2002. Long-term strength gain vs. deterioration of soils treated by lime and cement, *Proceedings from the Deep Mixing Workshop 2002*, Port and Airport Research Institute, Coastal Development Institute of Technology Tokyo.
- [98] Topolnicki M., 2003. Wzmacnianie i uszczelnianie gruntu metodą mieszania in situ (Soil Mixing). *Inżynieria Morska i Geotechnika*, Gdańsk. 6. 385-398.
- [99] Topolnicki M., 2004. Nowoczesne metody wzmacniania słabych gruntów dla bezpiecznego posadowienia dróg. *Ogólnopolska konferencja Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe*, Kielce.
- [100] Topolnicki M., 2009. Wzmacnianie i uszczelnianie gruntu metodą głębokiego mieszania na mokro (DSM). *XXIV Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji*, Beskidy.
- [101] Tremblay H., Duchesne J., Locat J., Leroueil S., 2002. Influence of the nature of organic compounds on fine soil stabilization with cement. *Canadian Geotechnical Journal*. 39. 535-546.
- [102] Wesołowski M., 2007. Współczesne metody analizy termicznej: podstawowe pojęcia i definicje. *Laboratorium*. 3. 40-44.
- [103] Wong L.S., Roslan H., Faisal H.A., 2009. Unconfined Compressive Strength of Cemented Peat. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 3(4). 3850-3856.

NORMY I SPECYFIKACJE TECHNICZNE

- [104] EuroSoilStab: Development of design and construction methods to stabilize soft organic soils. Design guide soft soil stabilization, CT97-0351, Project No. BE-96-3177, European Commission, Industrial & Materials Technologies Programme, Brussels, 2002.
- [105] PN-85/G-02500: Torf. Genetyczny podział surowca.
- [106] PN-86/B-02480: Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów.
- [107] PN-88/B-04481: Grunty Budowlane. Badania próbek gruntu.
- [108] PN-74/B-02480: Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów.
- [109] PN-EN ISO 14688-1: 2002: Badania geotechniczne. Oznaczenie i klasyfikowanie gruntów. Część 1: Oznaczenia i opis.

- [110] PN-EN ISO 14688-2: 2004: Badania geotechniczne. Oznaczenie i klasyfikowanie gruntów. Część 2: Zasady klasyfikowania.
- [111] PN-EN 12390-1: 2001: Badania betonu. Część 1: Kształt, wymiary i inne wymagania dotyczące próbek do badania i form.
- [112] PN-EN 12390-2: 2001: Badania betonu. Część 2: Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych.
- [113] PN-EN 12390-3: 2002: Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badania.
- [114] PN-EN 14679: 2005: Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych- Wgłębne mieszanie gruntu.
- [115] PN-EN 1997-2: 2009: Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne. Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego.
- [116] PKN-CEN ISO/TS 17892-1: 2009: Badania geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Część 1: Oznaczenie wilgotności.
- [117] PKN-CEN ISO/TS 17892-2: 2009: Badania geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Część 2: Oznaczenie gęstości gruntów drobnoziarnistych.
- [118] PKN-CEN ISO/TS 17892-7: 2009: Badania geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Część 7: Badanie na ściskanie gruntów drobnoziarnistych w jednoosiowym stanie naprężenia.

STRONY INTERNETOWE

- [119] <http://www.dabi.com.pl/>
- [120] <http://www.geo.uw.edu.pl/IHIGI/labzgi/>
- [121] <http://www.keller.com.pl/>
- [122] <http://www.menard.pl/>
- [123] <http://maps.geoportal.gov.pl/webclient/>
- [124] <http://maps.google.pl/>

INNE

- [125] Uniejewska M., Nosek M., 1988. Szczegółowa mapa geologiczna Polski, arkusz Łabiszyn (358). Skala 1:50000.
- [126] Mapa – Mokradła Polski, grupy zbiorowisk roślinnych, mapa opracowana w Zakładzie Ochrony Przyrody Obszarów Wiejskich IMUZ Falenty w ramach pracy System Informacji Przestrzennej o Mokradłach Polski.
- [127] Mapa – Mokradła Polski, typy siedlisk, mapa opracowana w Zakładzie Ochrony Przyrody Obszarów Wiejskich IMUZ Falenty w ramach pracy System Informacji Przestrzennej o Mokradłach Polski.

SPIS RYSUNKÓW

Rys. 1.	Podział organicznych związków próchnicznych [12,31]	15
Rys. 2.	Umowny system klasyfikacji ze względu na materiał wiążący, sposób mieszania i lokalizację procesu mieszania wzdłuż żerdzi wiertniczej [98]	28
Rys. 3.	Schemat formowania kolumny DSM „na sucho” na przykładzie metody Nordyckiej: 1, 2 – obracające się mieszadło wwierca się na zaprojektowaną głębokość, 3,4 – kierunek obrotu mieszadła zostaje zmieniony, mieszadło jest wyciągane przy jednoczesnym wtłaczaniu sprężonym powietrzem sproszkowanego spo- iwa, 5 – uformowana kolumna	31
Rys. 4.	Interpretacja graficzna wytrzymałości gruntu na ścinanie ozna- czonej w aparacie trójosiowego ściskania dla $\sigma_3 = 0$ [42].....	42
Rys. 5.	Lokalizacja miejsca pobrania materiału do badań [124].....	46
Rys. 6.	Mapa topograficzna w skali 1:25000 z zaznaczonym miejscem pobrania materiału do badań [123].....	47
Rys. 7.	Zdjęcie satelitarne miejsca pobrania gruntu [124]	48
Rys. 8.	Widok na torfowisko i wykop badawczy	49
Rys. 9.	Zdjęcia torfu wykonane mikroskopem optycznym: a) powięk- szenie 7x, b) powiększenie 20x.....	50
Rys. 10.	Wykorzystane przyrządy kieszonkowe wykorzystane w bada- niach in situ: a) penetrometr tłoczkowy (PP), b) ścinarka obro- towa (TV)	51
Rys. 11.	Derywatogram pobranego do badań torfu.....	55
Rys. 12.	Krzywa przedstawiająca ubytek masy w wyniku zmian tempe- ratury	56
Rys. 13.	Przystosowane na potrzeby badań pomieszczenie do badań kompozytów gruntowych.....	59
Rys. 14.	Stanowisko do badań wykonane według wytycznych metody fińskiej [53]	63
Rys. 15.	Procedura przygotowania próbek cylindrycznych kompozytu [53, 90, 104]	64
Rys. 16.	Zastosowane do badań formy sześciennie o wymiarach 150x150x150 mm i odważniki	64
Rys. 17.	Procedura przygotowania próbek sześciennych kompozytu.....	65
Rys. 18.	Prasa obciążeniowa ZD 10/90, I kl. dokładności wykorzystana do badań wytrzymałości kompozytów na jednoosiowe ściskanie	66
Rys. 19.	Widoczne nierówności podstaw próbek kompozytu na styku z płytą dociskową	67
Rys. 20.	Próbka sześcienna kompozytu K16 o naturalnej zawartości substancji organicznej pokryta pleśnią po 28 dniach dojrzewa- nia.....	69

Rys. 21. Próbka sześcienna kompozytu K18 o naturalnej zawartości substancji organicznej pokryta pleśnią po 28 dniach dojrzewania.....	69
Rys. 22. Próbka sześcienna kompozytu K16 o naturalnej zawartości substancji organicznej pokryta pleśnią po 7 dniach dojrzewania.....	70
Rys. 23. Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie próbek cylindrycznych kompozytu K1-K5 o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 20\%$ w zależności od stosunku masy dodawanego cementu do masy suchego gruntu m_c/m_s	71
Rys. 24. Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie próbek cylindrycznych kompozytu K6-K10 o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 40\%$ w zależności od stosunku masy dodawanego cementu do masy suchego gruntu m_c/m_s	72
Rys. 25. Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie próbek cylindrycznych kompozytu K11-K15 o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 60\%$ w zależności od stosunku masy dodawanego cementu do masy suchego gruntu m_c/m_s	73
Rys. 26. Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie próbek cylindrycznych kompozytu K16-K20 o naturalnej zawartości substancji organicznej w zależności od stosunku masy dodawanego cementu do masy suchego gruntu m_c/m_s	74
Rys. 27. Moduł odkształcenia próbek cylindrycznych kompozytu K1-K5 o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 20\%$ w zależności od stosunku masy dodawanego cementu do masy suchego gruntu m_c/m_s	75
Rys. 28. Moduł odkształcenia próbek cylindrycznych kompozytu K6-K10 o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 40\%$ w zależności od stosunku masy dodawanego cementu do masy suchego gruntu m_c/m_s	75
Rys. 29. Moduł odkształcenia próbek cylindrycznych kompozytu K11-K15 o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 60\%$ w zależności od stosunku masy dodawanego cementu do masy suchego gruntu m_c/m_s	76
Rys. 30. Moduł odkształcenia próbek cylindrycznych kompozytu K16-K20 o naturalnej zawartości substancji organicznej $I_{om} = 83,64 (84,40)\%$ w zależności od stosunku masy dodawanego cementu do masy suchego gruntu m_c/m_s	76
Rys. 31. Wykresy zależności naprężenia do odkształcenia względnego dla próbek cylindrycznych o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 20\%$ po 7 dniach dojrzewania: a) kompozyt K1, b) kompozyt K2, c) kompozyt K3, d) kompozyt K4, e) kompozyt K5.....	78

Rys. 32. Wykresy zależności naprężenia do odkształcenia względnego dla próbek cylindrycznych o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 40\%$ po 7 dniach dojrzewania: a) kompozyt K6, b) kompozyt K7, c) kompozyt K8, d) kompozyt K9, e) kompozyt K10	79
Rys. 33. Wykresy zależności naprężenia do odkształcenia względnego dla próbek cylindrycznych o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 60\%$ po 7 dniach dojrzewania: a) kompozyt K11, b) kompozyt K12, c) kompozyt K13, d) kompozyt K14, e) kompozyt K15	80
Rys. 34. Wykresy zależności naprężenia do odkształcenia względnego dla próbek cylindrycznych o naturalnej zawartości substancji organicznej po 7 dniach dojrzewania: a) kompozyt K16, b) kompozyt K17, c) kompozyt K18, d) kompozyt K19, e) kompozyt K20	81
Rys. 35. Wykresy zależności naprężenia do odkształcenia względnego dla próbek cylindrycznych o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 20\%$ po 28 dniach dojrzewania: a) kompozyt K1, b) kompozyt K2, c) kompozyt K3, d) kompozyt K4, e) kompozyt K5	82
Rys. 36. Wykresy zależności naprężenia do odkształcenia względnego dla próbek cylindrycznych o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 40\%$ po 28 dniach dojrzewania: a) kompozyt K6, b) kompozyt K7, c) kompozyt K8, d) kompozyt K9, e) kompozyt K10	83
Rys. 37. Wykresy zależności naprężenia do odkształcenia względnego dla próbek cylindrycznych o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 60\%$ po 28 dniach dojrzewania: a) kompozyt K11, b) kompozyt K12, c) kompozyt K13, d) kompozyt K14, e) kompozyt K15	84
Rys. 38. Wykresy zależności naprężenia do odkształcenia względnego dla próbek cylindrycznych o naturalnej zawartości substancji organicznej po 28 dniach dojrzewania: a) kompozyt K16, b) kompozyt K17, c) kompozyt K18, d) kompozyt K19, e) kompozyt K20	85
Rys. 39. Prosta regresji i granice przedziałów ufności tej prostej na poziomie 95% dla kompozytów K1-K5 o zawartości substancji organicznej o $I_{om} = 20\%$ po 7 dniach dojrzewania	93
Rys. 40. Prosta regresji i granice przedziałów ufności tej prostej na poziomie 95% dla kompozytów K6-K10 o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 40\%$ po 7 dniach dojrzewania	94
Rys. 41. Prosta regresji i granice przedziałów ufności tej prostej na poziomie 95% dla kompozytów K11-K15 o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 60\%$ po 7 dniach dojrzewania	94
Rys. 42. Prosta regresji i granice przedziałów ufności tej prostej na poziomie 95% dla kompozytów K16-K20 o naturalnej zawartości substancji organicznej po 7 dniach dojrzewania	95

Rys. 43.	Prosta regresji i granice przedziałów ufności tej prostej na poziomie 95% dla kompozytów K1-K5 o zawartości substancji organicznej o $I_{om} = 20\%$ po 28 dniach dojrzewania.....	96
Rys. 44.	Prosta regresji i granice przedziałów ufności tej prostej na poziomie 95% dla kompozytów K6-K10 o zawartości substancji organicznej o $I_{om} = 20\%$ po 28 dniach dojrzewania.....	96
Rys. 45.	Prosta regresji i granice przedziałów ufności tej prostej na poziomie 95% dla kompozytów K11-K15 o zawartości substancji organicznej o $I_{om} = 20\%$ po 28 dniach dojrzewania.....	97
Rys. 46.	Prosta regresji i granice przedziałów ufności tej prostej na poziomie 95% dla kompozytów K16-K20 o zawartości substancji organicznej o $I_{om} = 20\%$ po 28 dniach dojrzewania.....	97
Rys. 47.	Sposób zniszczenia ściskanych próbek cylindrycznych: a) kruche ściecie, b) zniekształcenie próbki bez wyraźnej płaszczyzny ścięcia.....	99
Rys. 48.	Miernik pH firmy Hanna Instruments, model HI 99121 zaopatrzone w elektrodę kombinowaną model HI 1292D	101
Rys. 49.	Odczyn pH kompozytów K1-K5 o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 20\%$ w zależności od ilości dodawanego spoiwa.....	102
Rys. 50.	Odczyn pH kompozytów K6-K10 o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 40\%$ w zależności od ilości dodawanego spoiwa.....	103
Rys. 51.	Odczyn pH kompozytów K11-K15 o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 60\%$ w zależności od ilości dodawanego spoiwa	103
Rys. 52.	Odczyn pH kompozytów K16-K20 o naturalnej zawartości substancji organicznej $I_{om} = 83,64 (84,40)\%$ w zależności od ilości dodawanego spoiwa.....	104
Rys. 53.	Procentowa zawartość wybranych frakcji substancji próchnicznych w badanych próbkach.....	106
Rys. 54.	Wzajemny stosunek kwasów huminowych do fulwowych w badanych próbkach.....	106
Rys. 55.	16-rzędowy spiralny tomograf komputerowy firmy Siemens – model Somatom Emotion – 16 podczas badania próbek cylindrycznych	109
Rys. 56.	Zniszczone próbki kompozytu K3 bezpośrednio po badaniach wytrzymałościowych.....	112
Rys. 57.	Analiza wybranych przekrojów poprzecznych kompozytu K3.....	113
Rys. 58.	Przestrzenna analiza wybranego punktu kompozytu: a), b) przekroje podłużne, c) przekrój poprzeczny	114
Rys. 59.	Zastosowanie funkcji ROI do analizy przykładowych przekrojów: a) kompozytu K3, b) kompozytu K19.....	115
Rys. 60.	Skaningowy mikroskop elektronowy firmy JOEL, typ JSM-6380 LA sprzężony z mikrosondą elektronową EDS.....	117

Rys. 61. Urządzenia wykorzystane w preparatyce próbek: a) komora próżniowa, b) napyłarka próżniowa	119
Rys. 62. Napyłone złotem próbki kompozytu przygotowane do badań w świetle elektronów wtórnych SEI.....	119
Rys. 63. Mikrostruktura kompozytu K3 w świetle elektronów odbitych BEI oraz analiza składu chemicznego za pomocą mikros sondy EDS, powiększenie 1500x.....	120
Rys. 64. Mikrostruktura kompozytu K3 w świetle elektronów wtórnych SEI: a) powiększenie 85x, b) powiększenie 900x, c) powiększenie 1300x, d) powiększenie 5000x.....	121
Rys. 65. Mikrostruktura kompozytu K18 w świetle elektronów wtórnych SEI: a) powiększenie 40x, b) powiększenie 1700x, c) powiększenie 2200x, d) powiększenie 5000x.....	122
Rys. 66. Charakterystyczne związki zaobserwowane w świetle elektronów wtórnych SEI: a) portlandyt, kompozyt K10, powiększenie 2200x, b) węglan wapnia, kompozyt K19 powiększenie 850x	123
Rys. 67. Mikrostruktura zniszczonego kompozytu K3 w świetle elektronów wtórnych SEI: a) powiększenie 100x, b) powiększenie 40x, c) powiększenie 1000x, d) powiększenie 1000x	123
Rys. 68. Mikrostruktura zniszczonego kompozytu K19 w świetle elektronów wtórnych SEI: a) powiększenie 90x, b) powiększenie 230x, c) powiększenie 1400x, d) powiększenie 1400x	124
Rys. 69. Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie σ_7 (kPa) próbek cylindrycznych kompozytów K1-K20 po 7 dniach dojrzewania	126
Rys. 70. Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie próbek cylindrycznych kompozytów K1-K20 po 28 dniach dojrzewania.....	127
Rys. 71. Przyrost wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie $\Delta\sigma$ (%) próbek cylindrycznych kompozytów K1-K20 po 28 dniach dojrzewania w stosunku do 7 dni	128
Rys. 72. Moduł odkształcenia M_7 próbek cylindrycznych kompozytów K1-K20 po 7 dniach dojrzewania.....	129
Rys. 73. Moduł odkształcenia M_{28} próbek cylindrycznych kompozytów K1-K20 po 28 dniach dojrzewania.....	129
Rys. 74. Przyrost modułu odkształcenia ΔM (%) próbek cylindrycznych kompozytu po 28 dniach dojrzewania w stosunku do 7 dni.....	130

SPIS TABEL

Tabela 1. Podział rodzimych gruntów organicznych według norm budowlanych [106, 109].....	17
Tabela 2. Klasyfikacja gruntów zawierających części organiczne [110].....	17
Tabela 3. Klasyfikacja gleb w zależności od zawartości masy organicznej [12].....	18
Tabela 4. Klasyfikacja gleb w zależności od ich miąższości w strefie przypowierzchniowej [12].....	18
Tabela 5. Genetyczny podział torfów [105].....	22
Tabela 6. Stopień rozłożenia mokrego torfu oznaczany przez wyciskanie [109].....	23
Tabela 7. Porównanie metody nordyckiej i japońskiej wgłębnego mieszania <i>in situ</i> [114].....	32
Tabela 8. Zalecane spoiwa w metodzie mieszania gruntu <i>in situ</i> „na sucho” [114].....	34
Tabela 9. Skład chemiczny cementu portlandzkiego [9, 20].....	35
Tabela 10. Główne minerały cementu [20].....	35
Tabela 11. Wyniki oznaczeń przeprowadzonych przy użyciu penetrometru tłoczkowego (PP) i ścinarki obrotowej (TV).....	51
Tabela 12. Średnie zawartości części organicznych w pobranym torfie metodą oznaczania strat prażenia.....	52
Tabela 13. Zestawienie podstawowych cech fizykochemicznych pobranego torfu.....	54
Tabela 14. Średnie wartości wyników badań kontrolnych cementu CEM II/B-V 32,5R w 2011 roku, udostępnione przez Dyckerhoff Polska Sp. z o.o.....	60
Tabela 15. Uproszczony zakres badań wytrzymałości kompozytów dla przyjętych zmiennych niezależnych.....	62
Tabela 16. Zawartość cementu (C) i piasku kwarcowego (P) wyrażona w kg/m^3 torfu w poszczególnych mieszankach oraz stosunek w/c	62
Tabela 17. Naprężenia niszczące kompozytów K1-K5 o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 20\%$ po 7 dniach dojrzewania w zależności od stosunku masy dodawanego cementu do masy suchego gruntu m_c/m_s	87
Tabela 18. Naprężenia niszczące kompozytów K6-K10 o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 40\%$ po 7 dniach dojrzewania w zależności od stosunku masy dodawanego cementu do masy suchego gruntu m_c/m_s	88

Tabela 19. Naprężenia niszczące kompozytów K11-K15 o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 60\%$ po 7 dniach dojrzewania w zależności od stosunku masy dodawanego cementu do masy suchego gruntu m_c/m_s	89
Tabela 20. Naprężenia niszczące kompozytów K16-K20 o naturalnej zawartości substancji organicznej po 7 dniach dojrzewania w zależności od stosunku masy dodawanego cementu do masy suchego gruntu m_c/m_s	89
Tabela 21. Naprężenia niszczące kompozytów K1-K5 o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 20\%$ po 28 dniach dojrzewania w zależności od stosunku masy dodawanego cementu do masy suchego gruntu m_c/m_s	90
Tabela 22. Naprężenia niszczące kompozytów K6-K10 o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 40\%$ po 28 dojrzewania w zależności od stosunku masy dodawanego cementu do masy suchego gruntu m_c/m_s	91
Tabela 23. Naprężenia niszczące kompozytów K11-K15 o zawartości substancji organicznej $I_{om} = 60\%$ po 28 dojrzewania w zależności od stosunku masy dodawanego cementu do masy suchego gruntu m_c/m_s	91
Tabela 24. Naprężenia niszczące kompozytów K16-K20 o naturalnej zawartości substancji organicznej po 28 dniach dojrzewania w zależności od stosunku masy dodawanego cementu do masy suchego gruntu m_c/m_s	92
Tabela 25. Zestawienie współczynników korelacji (r), współczynników determinacji (r^2) oraz funkcji regresji dla próbek cylindrycznych po 7 dniach dojrzewania	95
Tabela 26. Zestawienie współczynników korelacji (r), współczynników determinacji (r^2) oraz funkcji regresji dla próbek cylindrycznych po 28 dniach dojrzewania	98
Tabela 27. Wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie σ_7 (kPa) próbek cylindrycznych kompozytów K1-K20 po 7 dniach dojrzewania.....	126
Tabela 28. Wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie σ_{28} (kPa) próbek cylindrycznych kompozytów K1-K20 po 28 dniach dojrzewania.....	127

SPIS ZAŁĄCZNIKÓW

ZAŁĄCZNIK 1. Zestawienie wyników badań wytrzymałościowych na jednoosiowe ściskanie próbek cylindrycznych.....	151
ZAŁĄCZNIK 2. Wyniki badań wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie próbek sześciennych.....	173
ZAŁĄCZNIK 3. Mikrostruktury wybranych kompozytów w świetle elektronów wtórnych SEI.....	177

ZAŁĄCZNIK 1

Zestawienie wyników badań wytrzymałościowych na jednoosiowe ściskanie próbek cylindrycznych

Kompozyt K1

Rodzaj oznaczenia	Symbol	Jednostka	Nr próbki							
			1	2	3	4	5	6	7	
Średnica	Φ	m	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071
Wysokość	h	m	0,165	0,146	0,162	0,144	0,149	0,143	0,145	0,145
Pole przekroju	A	m ²	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396
Objętość	V	m ³	0,00065	0,00058	0,00064	0,00057	0,00059	0,00057	0,00057	0,00057
Masa	m	kg	0,9255	0,8125	0,9150	0,8055	0,8325	0,8325	0,8325	0,8450
Gęstość objętościowa	ρ	kg/m ³	1416,73	1405,61	1426,59	1412,85	1411,21	1470,42	1471,91	1471,91
Siła niszcząca	P	kN	0,370	0,420	0,350	0,410	0,390	0,730	0,620	0,620
Wytrzymałość na ściskanie	σ	kPa	93,45	106,08	88,40	103,56	98,50	184,38	156,60	156,60
Odształcenie niszczące	Δh	m	0,0023	0,0025	0,0024	0,0024	0,0022	0,0012	0,0012	0,0012
Moduł odkształcenia	M	MPa	6,70	6,20	5,97	6,21	6,67	21,97	18,92	18,92

- próbki badane po 28 dojrzwania

Kompozyt K2

Rodzaj oznaczenia	Symbol	Jednostka	Nr próbki							
			1	2	3	4	5	6	7	
Średnica	Φ	m	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071
Wysokość	h	m	0,150	0,149	0,148	0,145	0,150	0,149	0,144	0,144
Pole przekroju	A	m ²	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396
Objętość	V	m ³	0,00059	0,00059	0,00059	0,00057	0,00059	0,00059	0,00057	0,00057
Masa	m	kg	0,9110	0,8955	0,8850	0,8720	0,9090	0,8850	0,8850	0,4400
Gęstość objętościowa	ρ	kg/m ³	1533,98	1518,00	1510,34	1518,94	1530,62	1500,20	1500,20	771,76
Siła niszcząca	P	kN	1,650	1,870	1,760	1,810	1,700	2,030	2,030	1,880
Wytrzymałość na ściskanie	σ	kPa	416,75	472,32	444,54	457,16	429,38	512,73	512,73	474,84
Odształcenie niszczące	Δh	m	0,0018	0,0018	0,0019	0,0018	0,0018	0,0018	0,0010	0,0010
Moduł odkształcenia	M	MPa	34,73	39,10	34,63	36,83	35,78	76,40	76,40	68,38

- próbki badane po 28 dojrzewania

Kompozyt K3

Rodzaj oznaczenia	Symbol	Jednostka	Nr próbki							
			1	2	3	4	5	6	7	
Średnica	Φ	m	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071
Wysokość	h	m	0,147	0,153	0,153	0,151	0,149	0,145	0,137	0,137
Pole przekroju	A	m ²	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396
Objętość	V	m ³	0,00058	0,00061	0,00061	0,00060	0,00059	0,00057	0,00054	0,00054
Masa	m	kg	0,8975	0,9360	0,9165	0,0000	0,0000	0,8620	0,8210	0,8210
Gęstość objętościowa	ρ	kg/m ³	1542,09	1545,18	1512,98	0,00	0,00	1501,53	1513,62	1513,62
Siła niszcząca	P	kN	4,150	3,750	3,350	3,500	3,850	4,480	4,320	4,320
Wytrzymałość na ściskanie	σ	kPa	1048,19	947,16	846,13	884,02	972,42	1131,54	1091,13	1091,13
Odkształcenie niszczące	Δh	m	0,0018	0,0016	0,0016	0,0016	0,0017	0,0010	0,0010	0,0010
Moduł odkształcenia	M	MPa	85,60	90,57	80,91	83,43	85,23	164,07	149,49	149,49

- próbki badane po 28 dojrzwania

Kompozyt K4

Rodzaj oznaczenia	Symbol	Jednostka	Nr próbki							
			1	2	3	4	5	6	7	
Średnica	Φ	m	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071
Wysokość	h	m	0,145	0,150	0,152	0,145	0,153	0,149	0,143	0,143
Pole przekroju	A	m ²	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396
Objętość	V	m ³	0,00057	0,00059	0,00060	0,00057	0,00061	0,00059	0,00057	0,00057
Masa	m	kg	0,8815	0,9075	0,9315	0,8895	0,9445	0,8890	0,8585	0,8585
Gęstość objętościowa	ρ	kg/m ³	1535,49	1528,09	1547,86	1549,43	1559,21	1506,98	1516,34	1516,34
Siła niszcząca	P	kN	4,850	4,550	4,400	4,750	4,600	5,170	5,400	5,400
Wytrzymałość na ściskanie	σ	kPa	1225,00	1149,22	1111,34	1199,74	1161,85	1305,82	1363,91	1363,91
Odkształcenie niszczące	Δh	m	0,0016	0,0014	0,0014	0,0016	0,0015	0,0008	0,0009	0,0009
Moduł odkształcenia	M	MPa	111,02	123,13	120,66	108,73	118,51	243,21	216,71	216,71

- próbki badane po 28 dojrzwania

Kompozyt K5

Rodzaj oznaczenia	Symbol	Jednostka	Nr próbki								
			1	2	3	4	5	6	7		
Średnica	Φ	m	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071
Wysokość	h	m	0,145	0,145	0,153	0,143	0,147	0,148	0,140	0,140	0,140
Pole przekroju	A	m ²	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396
Objętość	V	m ³	0,00057	0,00057	0,00061	0,00057	0,00058	0,00059	0,00055	0,00055	0,00055
Masa	m	kg	0,8880	0,8610	0,9420	0,8685	0,8970	0,9135	0,8680	0,8680	0,8680
Gęstość objętościowa	ρ	kg/m ³	1546,82	1499,78	1555,08	1534,01	1541,23	1558,98	1565,98	1565,98	1565,98
Siła niszcząca	P	kN	5,200	4,550	5,250	4,850	4,450	6,300	5,750	5,750	5,750
Wytrzymałość na ściskanie	σ	kPa	1313,40	1149,22	1326,03	1225,00	1123,97	1591,23	1452,32	1452,32	1452,32
Odkształcenie niszczące	Δh	m	0,0014	0,0013	0,0014	0,0014	0,0012	0,0008	0,0007	0,0007	0,0007
Moduł odkształcenia	M	MPa	136,03	128,18	144,92	125,12	137,69	294,38	290,46	290,46	290,46

- próbki badane po 28 dojrzwania

Kompozyt K6

Rodzaj oznaczenia	Symbol	Jednostka	Nr próbki								
			1	2	3	4	5	6	7		
Średnica	Φ	m	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071
Wysokość	h	m	0,142	0,140	0,143	0,143	0,143	0,143	0,143	0,145	0,145
Pole przekroju	A	m ²	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396
Objętość	V	m ³	0,00056	0,00055	0,00057	0,00057	0,00057	0,00057	0,00057	0,00057	0,00057
Masa	m	kg	0,7095	0,6925	0,7075	0,7195	0,7155	0,7155	0,7310	0,7235	0,7235
Gęstość objętościowa	ρ	kg/m ³	1261,99	1249,35	1249,64	1270,83	1263,77	1273,34	1273,34	1260,27	1260,27
Siła niszcząca	P	kN	0,125	0,135	0,140	0,135	0,140	0,140	0,250	0,240	0,240
Wytrzymałość na ściskanie	σ	kPa	31,57	34,10	35,36	34,10	35,36	35,36	63,14	60,62	60,62
Odkształcenie niszczące	Δh	m	0,0025	0,0027	0,0027	0,0027	0,0027	0,0027	0,0019	0,0018	0,0018
Moduł odkształcenia	M	MPa	1,79	1,77	1,87	1,81	1,81	1,81	4,82	4,88	4,88

- próbki badane po 28 dojrzwania

Kompozyt K7

Rodzaj oznaczenia	Symbol	Jednostka	Nr próbki							
			1	2	3	4	5	6	7	
Średnica	Φ	m	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071
Wysokość	h	m	0,138	0,155	0,138	0,135	0,143	0,148	0,138	0,138
Pole przekroju	A	m ²	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396
Objętość	V	m ³	0,00055	0,00061	0,00055	0,00053	0,00057	0,00059	0,00055	0,00055
Masa	m	kg	0,7250	0,8220	0,7305	0,7010	0,7550	0,7665	0,7185	0,7185
Gęstość objętościowa	ρ	kg/m ³	1326,94	1339,47	1337,01	1311,53	1333,53	1308,11	1315,05	1315,05
Siła niszcząca	P	kN	0,33	0,36	0,36	0,32	0,36	0,54	0,56	0,56
Wytrzymałość na ściskanie	σ	kPa	83,35	90,93	90,93	80,82	90,93	136,39	141,44	141,44
Odkształcenie niszczące	Δh	m	0,0032	0,0034	0,0030	0,0030	0,0032	0,0013	0,0014	0,0014
Moduł odkształcenia	M	MPa	3,59	4,15	4,18	3,64	4,06	15,53	13,94	13,94

- próbki badane po 28 dojrzwania

Kompozyt K8

Rodzaj oznaczenia	Symbol	Jednostka	Nr próbki							
			1	2	3	4	5	6	7	
Średnica	Φ	m	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071
Wysokość	h	m	0,135	0,143	0,138	0,143	0,143	0,142	0,138	0,144
Pole przekroju	A	m ²	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396
Objętość	V	m ³	0,00053	0,00057	0,00055	0,00057	0,00057	0,00056	0,00055	0,00057
Masa	m	kg	0,7425	0,7915	0,7560	0,7730	0,7820	0,7820	0,7390	0,7560
Gęstość objętościowa	ρ	kg/m ³	1389,17	1398,00	1383,68	1365,33	1390,95	1352,57	1352,57	1326,03
Siła niszcząca	P	kN	0,53	0,48	0,47	0,47	0,44	0,44	0,89	0,85
Wytrzymałość na ściskanie	σ	kPa	133,87	121,24	118,71	118,71	111,13	111,13	224,79	214,69
Odkształcenie niszczące	Δh	m	0,0018	0,0016	0,0018	0,0018	0,0017	0,0017	0,0014	0,0015
Moduł odkształcenia	M	MPa	10,04	10,84	9,10	9,43	9,28	9,28	22,16	20,61

- próbki badane po 28 dojrzwania

Kompozyt K9

Rodzaj oznaczenia	Symbol	Jednostka	Nr próbki							
			1	2	3	4	5	6	7	
Średnica	Φ	m	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071
Wysokość	h	m	0,141	0,135	0,138	0,140	0,139	0,142	0,146	0,146
Pole przekroju	A	m ²	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396
Objętość	V	m ³	0,00056	0,00053	0,00055	0,00055	0,00055	0,00056	0,00058	0,00058
Masa	m	kg	0,7945	0,7585	0,7750	0,7885	0,7795	0,7520	0,7960	0,7960
Gęstość objętościowa	ρ	kg/m ³	1423,21	1419,11	1418,46	1422,55	1416,43	1337,59	1377,06	1377,06
Siła niszcząca	P	kN	0,500	0,485	0,470	0,490	0,510	0,950	0,950	0,950
Wytrzymałość na ściskanie	σ	kPa	126,29	122,50	118,71	123,76	128,81	239,95	239,95	239,95
Odkształcenie niszczące	Δh	m	0,0020	0,0015	0,0015	0,0016	0,0016	0,0014	0,0015	0,0015
Moduł odkształcenia	M	MPa	8,90	11,02	10,92	10,83	11,19	24,34	23,35	23,35

- próbki badane po 28 dojrzwania

Kompozyt K10

Rodzaj oznaczenia	Symbol	Jednostka	Nr próbki								
			1	2	3	4	5	6	7		
Średnica	Φ	m	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071
Wysokość	h	m	0,147	0,137	0,142	0,146	0,139	0,145	0,143	0,143	0,143
Pole przekroju	A	m ²	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396
Objętość	V	m ³	0,00058	0,00054	0,00056	0,00058	0,00055	0,00057	0,00057	0,00057	0,00057
Masa	m	kg	0,8505	0,7895	0,8270	0,8445	0,8060	0,7950	0,7725	0,7725	0,7725
Gęstość objętościowa	ρ	kg/m ³	1461,34	1455,54	1470,99	1460,97	1464,58	1384,82	1364,44	1364,44	1364,44
Siła niszcząca	P	kN	0,680	0,720	0,660	0,630	0,680	1,490	1,470	1,470	1,470
Wytrzymałość na ściskanie	σ	kPa	171,75	181,86	166,70	159,12	171,75	376,34	371,29	371,29	371,29
Odkształcenie niszczące	Δh	m	0,0014	0,0014	0,0016	0,0014	0,0013	0,0015	0,0016	0,0016	0,0016
Moduł odkształcenia	M	MPa	18,03	17,80	14,79	16,59	18,36	36,38	33,18	33,18	33,18

- próbki badane po 28 dojrzwania

Kompozyt K10

Rodzaj oznaczenia	Symbol	Jednostka	Nr próbki							
			1	2	3	4	5	6	7	
Średnica	Φ	m	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071
Wysokość	h	m	0,147	0,137	0,142	0,146	0,139	0,145	0,143	0,143
Pole przekroju	A	m ²	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396
Objętość	V	m ³	0,00058	0,00054	0,00056	0,00058	0,00055	0,00057	0,00057	0,00057
Masa	m	kg	0,8505	0,7895	0,8270	0,8445	0,8060	0,7950	0,7725	0,7725
Gęstość objętościowa	ρ	kg/m ³	1461,34	1455,54	1470,99	1460,97	1464,58	1384,82	1364,44	1364,44
Siła niszcząca	P	kN	0,680	0,720	0,660	0,630	0,680	1,490	1,470	1,470
Wytrzymałość na ściskanie	σ	kPa	171,75	181,86	166,70	159,12	171,75	376,34	371,29	371,29
Odkształcenie niszczące	Δh	m	0,0014	0,0014	0,0016	0,0014	0,0013	0,0015	0,0016	0,0016
Moduł odkształcenia	M	MPa	18,03	17,80	14,79	16,59	18,36	36,38	33,18	33,18

- próbki badane po 28 dojrzwania

Kompozyt K11

Rodzaj oznaczenia	Symbol	Jednostka	Nr próbki							
			1	2	3	4	5	6	7	
Średnica	Φ	m	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071
Wysokość	h	m	0,130	0,136	0,143	0,138	0,140	0,142	0,145	0,145
Pole przekroju	A	m ²	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396
Objętość	V	m ³	0,00051	0,00054	0,00057	0,00055	0,00055	0,00056	0,00057	0,00057
Masa	m	kg	0,5980	0,6260	0,6525	0,6320	0,6455	0,6810	0,7010	0,7010
Gęstość objętościowa	ρ	kg/m ³	1161,85	1162,60	1152,49	1156,73	1164,56	1211,30	1221,08	1221,08
Siła niszcząca	P	kN	0,130	0,152	0,135	0,140	0,140	0,210	0,180	0,180
Wytrzymałość na ściskanie	σ	kPa	32,83	38,39	34,10	35,36	35,36	53,04	45,46	45,46
Odkształcenie niszczące	Δh	m	0,0032	0,0031	0,0032	0,0031	0,0033	0,0028	0,0027	0,0027
Moduł odkształcenia	M	MPa	1,33	1,68	1,52	1,57	1,50	2,69	2,44	2,44

- próbki badane po 28 dojrzwania

Kompozyt K12

Rodzaj oznaczenia	Symbol	Jednostka	Nr próbki							
			1	2	3	4	5	6	7	
Średnica	Φ	m	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071
Wysokość	h	m	0,143	0,131	0,140	0,140	0,140	0,140	0,144	0,143
Pole przekroju	A	m ²	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396
Objętość	V	m ³	0,00057	0,00052	0,00055	0,00055	0,00055	0,00055	0,00057	0,00057
Masa	m	kg	0,6945	0,6390	0,6800	0,6890	0,6795	0,7035	0,7140	0,7140
Gęstość objętościowa	ρ	kg/m ³	1226,68	1232,03	1226,80	1243,04	1225,90	1233,94	1261,12	1261,12
Siła niszcząca	P	kN	0,200	0,190	0,180	0,170	0,170	0,340	0,320	0,320
Wytrzymałość na ściskanie	σ	kPa	50,52	47,99	45,46	42,94	42,94	85,88	80,82	80,82
Odkształcenie niszczące	Δh	m	0,0024	0,0026	0,0026	0,0026	0,0026	0,0020	0,0022	0,0022
Moduł odkształcenia	M	MPa	3,01	2,42	2,45	2,31	2,31	6,18	5,25	5,25

- próbki badane po 28 dojrzwania

Kompozyt K13

Rodzaj oznaczenia	Symbol	Jednostka	Nr próbki							
			1	2	3	4	5	6	7	
Średnica	Φ	m	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071
Wysokość	h	m	0,144	0,140	0,143	0,139	0,137	0,143	0,155	0,155
Pole przekroju	A	m ²	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396
Objętość	V	m ³	0,00057	0,00055	0,00057	0,00055	0,00054	0,00057	0,00061	0,00061
Masa	m	kg	0,7235	0,6980	0,7105	0,6995	0,6875	0,7285	0,7800	0,7800
Gęstość objętościowa	ρ	kg/m ³	1269,02	1259,28	1254,94	1271,06	1267,49	1286,73	1271,03	1271,03
Siła niszcząca	P	kN	0,260	0,270	0,230	0,220	0,195	0,430	0,450	0,450
Wytrzymałość na ściskanie	σ	kPa	65,67	68,20	58,09	55,57	49,25	108,61	113,66	113,66
Odkształcenie niszczące	Δh	m	0,0024	0,0023	0,0024	0,0022	0,0021	0,0015	0,0016	0,0016
Moduł odkształcenia	M	MPa	3,94	4,15	3,46	3,51	3,21	10,35	11,01	11,01

- próbki badane po 28 dojrzwania

Kompozyt K14

Rodzaj oznaczenia	Symbol	Jednostka	Nr próbki							
			1	2	3	4	5	6	7	
Średnica	Φ	m	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071
Wysokość	h	m	0,142	0,143	0,146	0,142	0,139	0,145	0,146	0,146
Pole przekroju	A	m ²	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396
Objętość	V	m ³	0,00056	0,00057	0,00058	0,00056	0,00055	0,00057	0,00057	0,00058
Masa	m	kg	0,7350	0,7400	0,7630	0,7390	0,7140	0,7260	0,7430	0,7430
Gęstość objętościowa	ρ	kg/m ³	1307,35	1307,04	1319,97	1314,47	1297,41	1264,63	1285,37	1285,37
Siła niszcząca	P	kN	0,430	0,430	0,450	0,450	0,400	0,680	0,680	0,680
Wytrzymałość na ściskanie	σ	kPa	108,61	108,61	113,66	113,66	101,03	171,75	171,75	171,75
Odkształcenie niszczące	Δh	m	0,0017	0,0016	0,0017	0,0020	0,0018	0,0015	0,0016	0,0016
Moduł odkształcenia	M	MPa	9,07	9,71	9,76	8,07	7,80	16,60	15,67	15,67

- próbki badane po 28 dojrzwania

Kompozyt K15

Rodzaj oznaczenia	Symbol	Jednostka	Nr próbki								
			1	2	3	4	5	6	7		
Średnica	Φ	m	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071
Wysokość	h	m	0,140	0,140	0,140	0,133	0,145	0,148	0,134	0,148	0,134
Pole przekroju	A	m ²	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396
Objętość	V	m ³	0,00055	0,00055	0,00055	0,00053	0,00057	0,00059	0,00053	0,00059	0,00053
Masa	m	kg	0,7305	0,7340	0,7330	0,6990	0,7475	0,7730	0,7015	0,7730	0,7015
Gęstość objętościowa	ρ	kg/m ³	1317,91	1324,22	1322,42	1327,45	1302,08	1319,20	1322,26	1319,20	1322,26
Siła niszcząca	P	kN	0,400	0,430	0,450	0,430	0,400	1,000	1,110	1,000	1,110
Wytrzymałość na ściskanie	σ	kPa	101,03	108,61	113,66	108,61	101,03	252,58	280,36	252,58	280,36
Odkształcenie niszczące	Δh	m	0,0015	0,0017	0,0018	0,0016	0,0016	0,0015	0,0012	0,0015	0,0012
Moduł odkształcenia	M	MPa	9,43	8,94	8,84	9,03	9,16	24,92	31,31	24,92	31,31

- próbki badane po 28 dojrzwania

Kompozyt K16

Rodzaj oznaczenia	Symbol	Jednostka	Nr próbki							
			1	2	3	4	5	6	7	
Średnica	Φ	m	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071
Wysokość	h	m	0,143	0,143	0,140	0,144	0,140	0,140	0,135	0,138
Pole przekroju	A	m ²	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396
Objętość	V	m ³	0,00057	0,00057	0,00055	0,00057	0,00055	0,00055	0,00053	0,00055
Masa	m	kg	0,6365	0,6375	0,6280	0,6400	0,6195	0,6045	0,6045	0,6205
Gęstość objętościowa	ρ	kg/m ³	1124,23	1126,00	1132,99	1122,56	1117,65	1130,98	1130,98	1135,68
Siła niszcząca	P	kN	0,150	0,160	0,160	0,180	0,150	0,170	0,170	0,190
Wytrzymałość na ściskanie	σ	kPa	37,89	40,41	40,41	45,46	37,89	42,94	42,94	47,99
Odkształcenie niszczące	Δh	m	0,0034	0,0036	0,0035	0,0037	0,0035	0,0030	0,0030	0,0030
Moduł odkształcenia	M	MPa	1,59	1,61	1,62	1,77	1,52	1,93	1,93	2,21

- próbki badane po 28 dojrzwania

Kompozyt K17

Rodzaj oznaczenia	Symbol	Jednostka	Nr próbki							
			1	2	3	4	5	6	7	
Średnica	Φ	m	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071
Wysokość	h	m	0,150	0,143	0,140	0,140	0,140	0,142	0,140	0,137
Pole przekroju	A	m ²	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396
Objętość	V	m ³	0,00059	0,00057	0,00055	0,00055	0,00055	0,00056	0,00055	0,00054
Masa	m	kg	0,6860	0,6515	0,6385	0,6330	0,6495	0,6495	0,6555	0,6325
Gęstość objętościowa	ρ	kg/m ³	1155,12	1150,73	1151,93	1142,01	1155,27	1155,27	1182,60	1166,09
Siła niszcząca	P	kN	0,210	0,230	0,210	0,200	0,210	0,210	0,240	0,210
Wytrzymałość na ściskanie	σ	kPa	53,04	58,09	53,04	50,52	53,04	53,04	60,62	53,04
Odkształcenie niszczące	Δh	m	0,0032	0,0031	0,0030	0,0032	0,0030	0,0030	0,0031	0,0030
Moduł odkształcenia	M	MPa	2,49	2,68	2,48	2,21	2,51	2,51	2,74	2,42

- próbki badane po 28 dojrzwania

Kompozyt K18

Rodzaj oznaczenia	Symbol	Jednostka	Nr próbki							
			1	2	3	4	5	6	7	
Średnica	Φ	m	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071
Wysokość	h	m	0,135	0,140	0,136	0,144	0,140	0,136	0,147	0,147
Pole przekroju	A	m ²	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396
Objętość	V	m ³	0,00053	0,00055	0,00054	0,00057	0,00055	0,00054	0,00058	0,00058
Masa	m	kg	0,6350	0,6760	0,6540	0,6950	0,6810	0,6495	0,7090	0,7090
Gęstość objętościowa	ρ	kg/m ³	1188,05	1219,59	1214,60	1219,03	1228,61	1206,24	1218,21	1218,21
Siła niszcząca	P	kN	0,270	0,250	0,230	0,200	0,240	0,250	0,280	0,280
Wytrzymałość na ściskanie	σ	kPa	68,20	63,14	58,09	50,52	60,62	63,14	70,72	70,72
Odkształcenie niszczące	Δh	m	0,0030	0,0031	0,0023	0,0031	0,0031	0,0030	0,0031	0,0031
Moduł odkształcenia	M	MPa	3,07	2,85	3,44	2,35	2,74	2,86	3,35	3,35

- próbki badane po 28 dojrzwania

Kompozyt K19

Rodzaj oznaczenia	Symbol	Jednostka	Nr próbki								
			1	2	3	4	5	6	7		
Średnica	Φ	m	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071
Wysokość	h	m	0,144	0,145	0,142	0,148	0,150	0,143	0,140	0,140	0,140
Pole przekroju	A	m ²	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396
Objętość	V	m ³	0,00057	0,00057	0,00056	0,00059	0,00059	0,00057	0,00055	0,00055	0,00055
Masa	m	kg	0,7015	0,7150	0,6920	0,7235	0,7465	0,6910	0,6840	0,6840	0,6840
Gęstość objętościowa	ρ	kg/m ³	1230,43	1245,46	1230,87	1234,72	1256,99	1220,49	1234,02	1234,02	1234,02
Siła niszcząca	P	kN	0,250	0,280	0,250	0,240	0,290	0,310	0,280	0,280	0,280
Wytrzymałość na ściskanie	σ	kPa	63,14	70,72	63,14	60,62	73,25	78,30	70,72	70,72	70,72
Odkształcenie niszczące	Δh	m	0,0026	0,0024	0,0024	0,0023	0,0026	0,0030	0,0030	0,0030	0,0030
Moduł odkształcenia	M	MPa	3,50	4,27	3,74	3,90	4,23	3,73	3,30	3,30	3,30

- próbki badane po 28 dojrzwania

Kompozyt K20

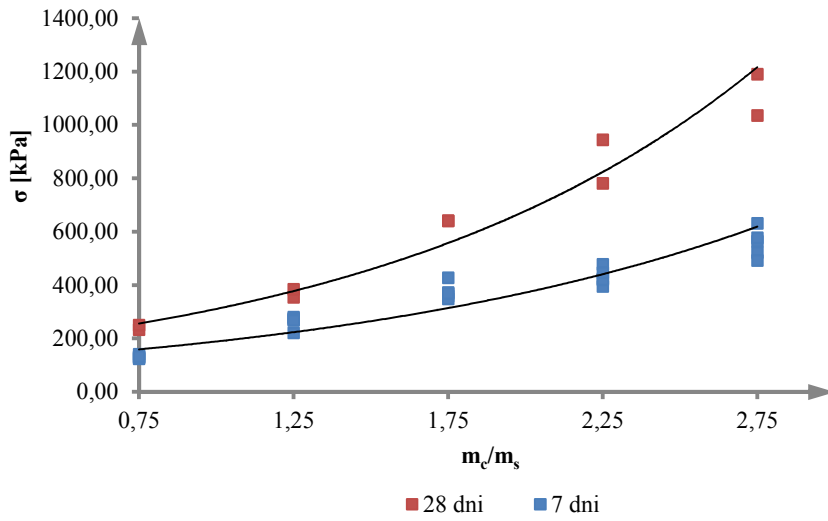
Rodzaj oznaczenia	Symbol	Jednostka	Nr próbki							
			1	2	3	4	5	6	7	
Średnica	Φ	m	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071
Wysokość	h	m	0,140	0,140	0,139	0,141	0,139	0,137	0,139	0,130
Pole przekroju	A	m ²	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396	0,00396
Objętość	V	m ³	0,00055	0,00055	0,00055	0,00056	0,00055	0,00054	0,00054	0,00051
Masa	m	kg	0,6850	0,6735	0,6780	0,6910	0,6650	0,6800	0,6800	0,6530
Gęstość objętościowa	ρ	kg/m ³	1235,82	1215,07	1231,99	1237,81	1208,37	1253,67	1253,67	1268,71
Siła niszcząca	P	kN	0,350	0,400	0,360	0,330	0,375	0,420	0,420	0,430
Wytrzymałość na ściskanie	σ	kPa	88,40	101,03	90,93	83,35	94,72	106,08	106,08	108,61
Odkształcenie niszczące	Δh	m	0,0020	0,0022	0,0019	0,0022	0,0020	0,0018	0,0018	0,0018
Moduł odkształcenia	M	MPa	6,19	6,43	6,65	5,34	6,58	8,07	8,07	7,84

- próbki badane po 28 dojrzwania

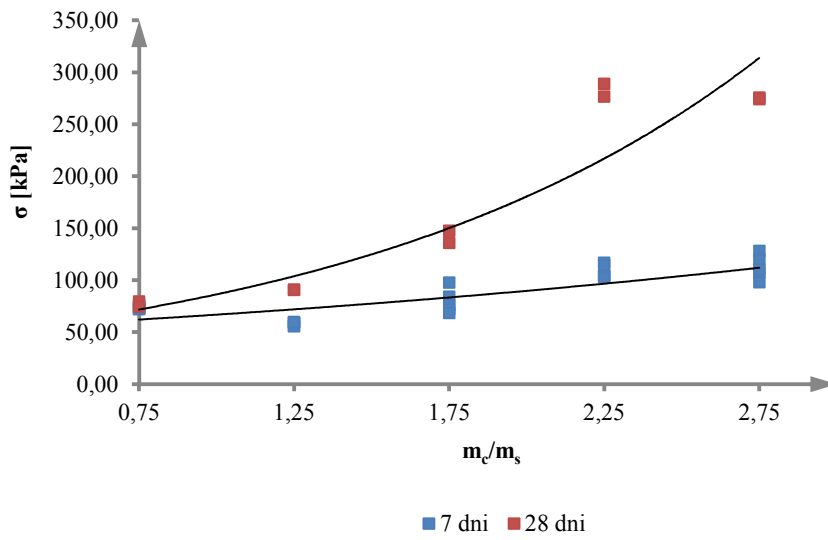
ZAŁĄCZNIK 2

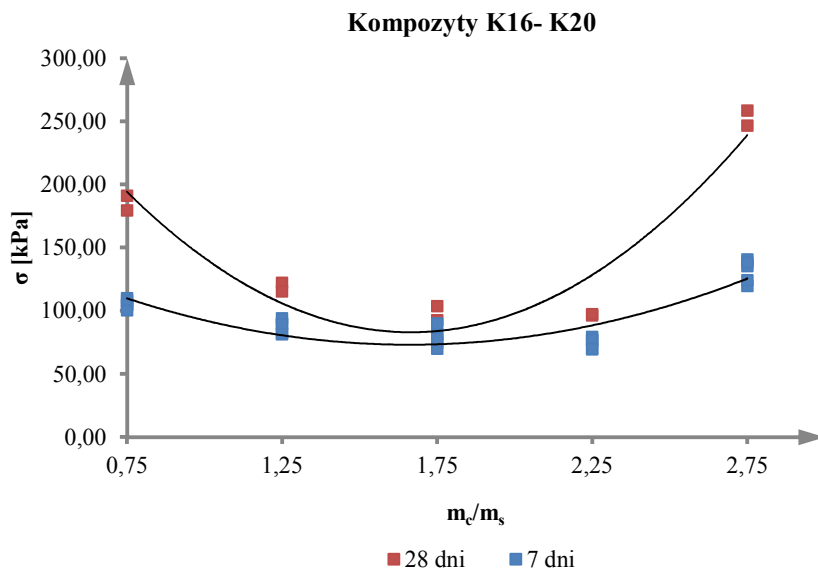
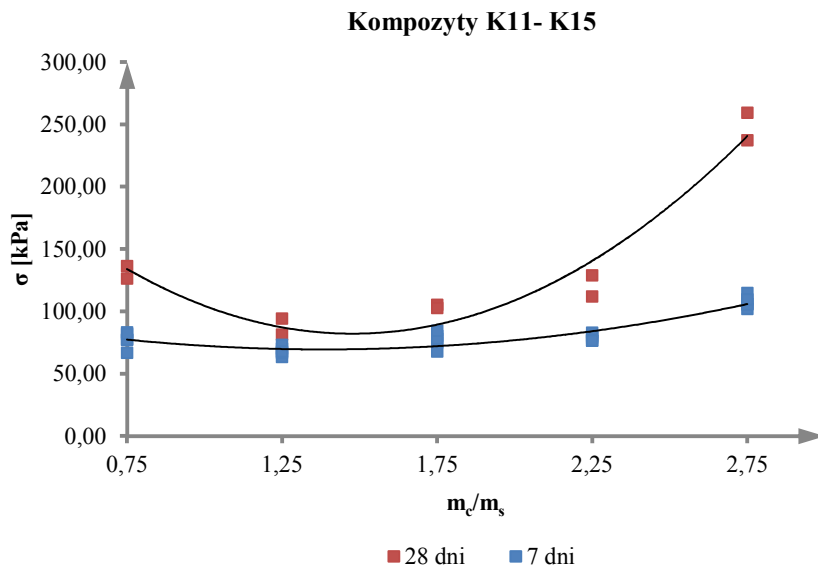
Wyniki badań wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie próbek sześciennych

Kompozyty K1- K5



Kompozyty K6- K10

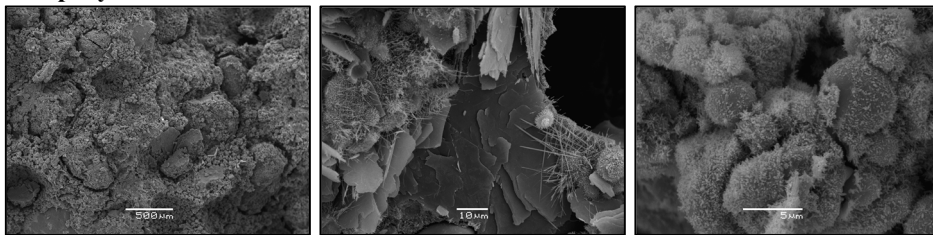




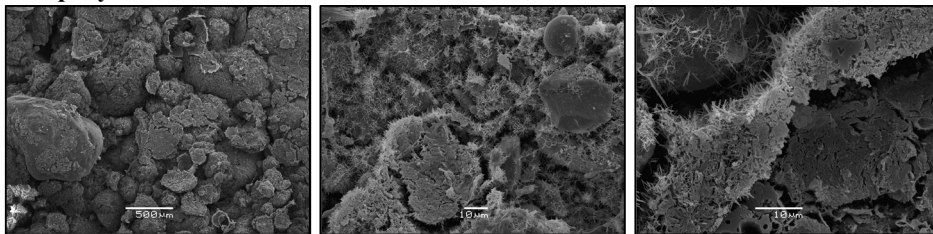
ZAŁĄCZNIK 3

Mikrostruktury wybranych kompozytów w świetle elektronów wtórnych SEI

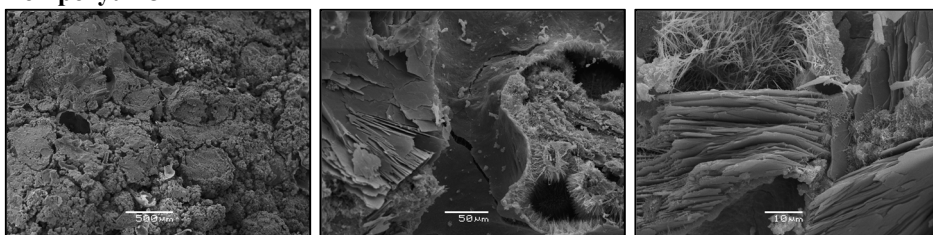
Kompozyt K3



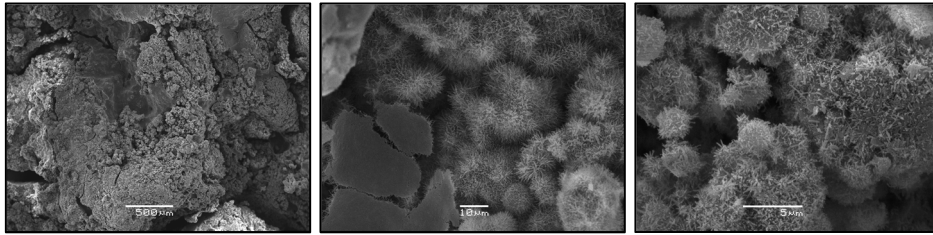
Kompozyt K6



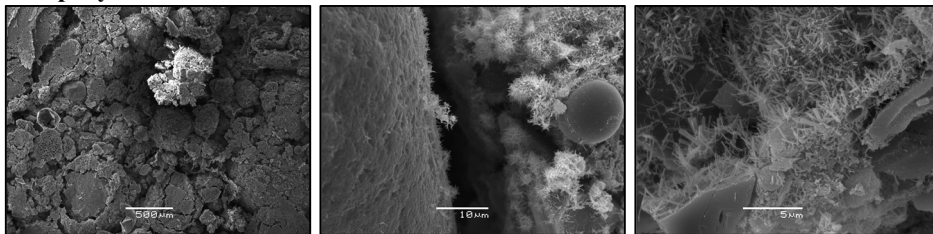
Kompozyt K8



Kompozyt K10



Kompozyt 13



Kompozyt 18

