

Katarzyna Machowiak, Adam Duda, Barbara Filipowicz, Michalina Flieger-Szymańska, Antoni Florkiewicz, Tomasz Jeż, Miłosz Just, Dorota Krawczyk, Albert Kubzdela, Szymon Węgliński, Andrzej Wojtasik

*Institut Inżynierii Lądowej, Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu, Politechnika Poznańska*

## **Badania gruntów i skał oraz fundamentowanie w złożonych warunkach geologiczno-inżynierskich**

### **Research of soil, rocks and foundations in complex geological and engineering conditions**

#### *Streszczenie*

Aktywność naukowa zespołu Zakładu Geotechniki i Geologii Inżynierskiej, a od 1 października 2020 r. Zakładu Geotechniki, Geologii Inżynierskiej i Geodezji dotyczy określania warunków gruntowo-wodnych oraz fundamentowania w złożonych warunkach geologiczno-inżynierskich. W Zakładzie prowadzone są badania dotyczące parametrów fizykomechanicznych ilów warwowych, możliwości obiektywizacji wartości stopnia plastyczności gruntów spoistych o różnej genezie oraz sufozyjności kruszyw, głównie piasków o wysokim wskaźniku różnoziarnistości. Ponadto analizie poddawane są konstrukcje oporowe budowane z wykorzystaniem komórkowego systemu ograniczającego. Prace badawcze dotyczą również budownictwa drogowego – analizowany jest wpływ dodatku mleczanu diamidoaminy na wytrzymałość na ścislenie i mrozoodporność gruntów. Wynikiem prac realizowanych w zespole jest także wdrażanie skomplikowanych

i nowatorskich rozwiązań projektowych, m.in. posadowienia wysokiego nasypu na podłożu słabonośnym (torf, gytia) sięgającym do 18 m głębokości wraz z projektem lekkiego nasypu drogowego zbudowanego z keramzytu. W zakresie prowadzonych badań znajduje się także analiza współpracy podłoża gruntowego z konstrukcją oraz oddziaływania konstrukcji na podłoże gruntowe i sąsiadujące obiekty, analiza złożonych zagadnień geotechnicznych przy użyciu metody elementów skończonych, opisywanie zachowania gruntu modelami konstytutywnymi oraz kalibracja tych modeli.

#### *Abstract*

The scientific activity of the team of the Division of Geotechnics and Engineering Geology, and from 01/10/2020 of the Division of Geotechnics, Engineering Geology and Surveying, concerns the determination of soil and water conditions and foundation designs in complex geological conditions. In the Division, research are carried out on the physical and mechanical parameters of the varved clays, the predictions of the degree of plasticity of various cohesive soils and the suffosion of aggregates and sands with high coefficient of uniformity. Another Division's activities concern building geo-grid retaining structures and researching them. Additional research involves road constructions – the influence of the addition of diamidoamine lactate on the compressive strength and frost resistance of soils is analyzed. The team work of the Division resulted in implementation of complex and innovative design solutions, including the design of high embankment settled on weak-bearing soil substrate (peat, gyttja) up to 18 m deep, and design of a light embankment made of expanded clay aggregate. The scope of research also includes the cooperation of the soil and structure and analysis of the structure on the subsoil and adjacent objects, analysis of geotechnical models using Finite Element Method, describing soil behaviour with constitutive models and calibration of these models.

## **Wstęp**

Problemem współczesnego budownictwa jest maksymalne zagospodarowanie terenów dostępnych pod zabudowę, podczas gdy obszary o prostej budowie geologicznej (wolne od geozagrożeń) spotykane są w procesie inwestycyjnym coraz rzadziej. Aktywność naukowa zespołu Zakładu Geotechniki i Geologii Inżynierskiej, a od 1 października 2020 r. Zakładu Geotechniki, Geologii Inżynierskiej i Geodezji (ZGGliG) dotyczy określania warunków gruntowo-wodnych oraz fundamentowania w złożonych warunkach geologiczno-inżynierskich [30, 31, 32, 39, 41, 42]. Aktualnie realizowane inwestycje budowlane wkraczają też coraz częściej w obszary cenne ekologicznie i dlatego współcześnie aspekty ekologiczne w budownictwie odgrywają w problematyce badawczej pracowników niezwykle istotną rolę [6, 32, 33, 35, 40]. Odrębnym przedmiotem badań są dla pracowników ZGGliG kruszywa mineralne stosowane do

produkcji betonu i mieszanek mineralno-asfaltowych. W ZGGliG prowadzone są analizy wpływu składu mineralnego kruszyw, ich struktur, porowatości i innych cech fizykochemicznych na adhezję lepiszcza asfaltowego do ich powierzchni [4], a w kontekście kruszyw w betonie obserwowane i rozpoznawane reakcje alkaliczno-krzemionkowe kruszyw z zaczynem cementowym [23, 24]. Kolejnymi tematami badawczymi realizowanymi w Zakładzie są tematy stricte geologiczne, związane z petrologią i geochemią wybranych obszarów i jednostek w polskich i czeskich Sudetach [12, 25, 28, 29], jak również interpretacja geochemiczna osadów z obszarów dość odległych geograficznie, jak Wyspa Króla Jerzego w Antarktyce [34] czy też tereny mongolskiego Changaju [37, 38]. Ostatnie z wymienionych badań prowadzone są przy współpracy z innymi ośrodkami badawczymi w kraju.

Poniżej przedstawione zostały najważniejsze osiągnięcia badawcze pracowników ZGGliG, które stanowią wyniki obronionych rozpraw doktorskich lub były przedmiotem ważniejszych publikacji.

## **1. Parametry fizykomechaniczne iłów warwowych z doliny Strumienia Junikowskiego ze szczególnym uwzględnieniem ich wytrzymałości na ścinanie**

Wyniki badań dotyczą parametrów fizykomechanicznych iłów warwowych występujących w południowo-zachodniej części Poznania, w centralnej części doliny Strumienia Junikowskiego [8, 9, 10, 11]. Dla badanych gruntów zostały oznaczone podstawowe parametry fizyczne oraz parametry mechaniczne (wytrzymałościowe).

Zastoiisko iłów warwowych, z obszaru którego zostały pobrane próbki do dalszych badań, tworzyło się na przedpolu lądolodu w plejstocenie, pomiędzy fazą poznańską i leszczyńską zlodowacenia północnopolskiego. Iły warwowe (fot. 1) są gruntami anizotropowymi zbudowanymi z warw w postaci warstwy jasnej (letniej) i ciemnej (zimowej) – deponowanych w zbiorniku podczas jednego roku glacialnego.

Grunty tworzące warstwy jasne i ciemne mają różny skład granulometryczny. Warstwy jasne budują gliny pylaste zwięzłe i iły pylaste, a warstwy ciemne – iły. Zawartość frakcji iłowej w warstwie jasnej wynosi 24-42%, a w ciemnej 54-82%. Do określenia składu mineralnego frakcji iłowej wykorzystano analizę rentgenowską. Zespół zidentyfikowanych minerałów ilastych nie różni się w obu warstwach. Dominującym minerałem jest illit, występują też: kaolinit, smektyt i chloryt.

Wytrzymałość na ścinanie oznaczono w aparacie bezpośredniego ścinania w Laboratorium Mechaniki Gruntów na próbkach gruntów z warstw jasnych i oddzielnie z warstw ciemnych, zarówno na próbach o nienaruszonej strukturze, jak i próbkach przygotowanych z past gruntowych. Podjęto także próbę oznaczenia wytrzymałości na ścinanie iłów warwowych w aparacie trójosiowym (metodą CD) dla badań pilotażowych próbek nierozdzielonych na warstwy jasne i ciemne o nienaruszonej strukturze.



*Fot. 1. Widoczne w powiększeniu warstwowanie iłłów warwowych w odślonięciu na obszarze jednego ze stanowisk badawczych*

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań parametrów fizycznych stwierdzono, że grunty tworzące warstwy jasne i ciemne w iłłach warwowych z doliny Strumienia Junikowskiego mają zbliżone wartości wilgotności, którym odpowiadają różne stany fizyczne. Otrzymane wyniki badań wykazały, że wytrzymałość na ścinanie iłłów warwowych zależy od wytrzymałości każdej z warstw (tj. warstwy jasnej i warstwy ciemnej).

Wartości spójności dla warstw jasnych mieszczą się w zakresie 21,9-55,7 kPa (średnio 34,7 kPa), a wartości kątów tarcia wewnętrznego 11,0-20,7° (średnio 16,2°). Wartości spójności dla warstw ciemnych wynoszą 33,2-75,7 kPa (średnio 53,4 kPa), a kątów tarcia wewnętrznego 6,0-14,9° (średnio 9,8°). Wartości spójności i kątów tarcia wewnętrznego determinowane są prawdopodobnie zarówno składem mineralnym frakcji iłłowej, jak i procentowym udziałem tej frakcji w obu analizowanych warstwach.

Wartości średnie parametrów wytrzymałościowych wyznaczonych oddzielnie dla gruntów z warstw jasnych i ciemnych iłłów warwowych z doliny Strumienia Junikowskiego porównano z wartościami normowymi dla gruntów spoistych oznaczonych symbolami „C” i „D”, według geologicznej klasyfikacji genetycznej gruntów (PN-81/B-03020), oraz z wynikami badań wytrzymałości na ścinanie z dwóch innych obszarów występowania iłłów warwowych na obszarze Polski.

Wartości parametrów wytrzymałościowych oznaczonych w aparacie bezpośredniego ścinania (fot. 2) oddzielnie dla gruntów z warstw jasnych i ciemnych pozwoliły określić opór na ścinanie układu warstw, tj. warw wzdłuż dowolnego kierunku [10, 11].



*Fot. 2. Stanowisko do oznaczania wytrzymałości w aparacie bezpośredniego ścinania*

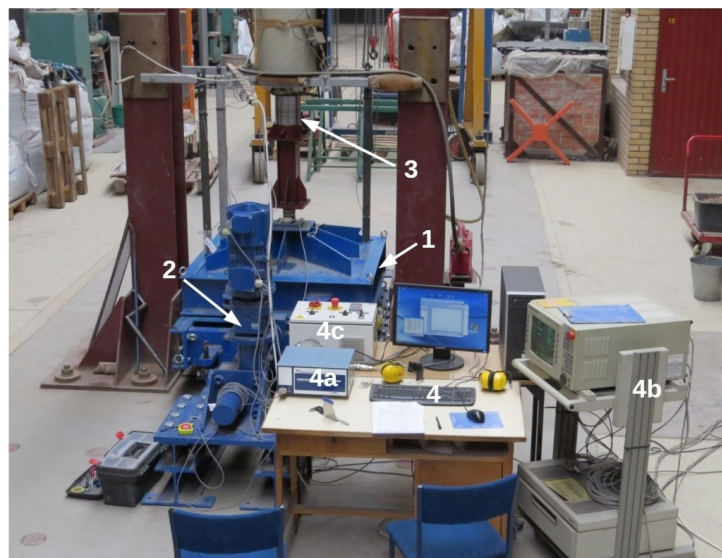
## **2. Analiza właściwości mechanicznych przestrzennego systemu geosyntetycznego jako materiału do budowy konstrukcji oporowych**

Konstrukcje oporowe budowane z wykorzystaniem komórkowego systemu ograniczającego muszą spełniać warunki stanów granicznych: nośności podłoża, stateczności na obrót i przesuw oraz stateczności globalnej. Ze względu na ich warstwową budowę muszą także zapewniać stateczność wewnętrzną konstrukcji, tj. międzywarstwową. Zależy ona m.in. od szerokości (głębokości) konstrukcji oraz oporów tarcia pomiędzy leżącymi na sobie warstwami konstrukcyjnymi. Zasadniczym celem badań było doskonalenie metod obliczania i projektowania konstrukcji oporowych zbudowanych z geokomórkowego systemu ograniczającego – z uwzględnieniem jego rzeczywistych właściwości. Oprócz standardowej konstrukcji rozważano nowy sposób łączenia warstw konstrukcyjnych zaproponowany w celu zwiększenia tarcia międzywarstwowego. W szczególności przeprowadzono analizę i badania właściwości oraz zachowanie się układu/bloku warstw konstrukcyjnych jako materiału do budowy grawitacyjnych konstrukcji oporowych. Tezy badawcze sformułowano następująco: a) wytrzymałość na ścinanie wzdłuż powierzchni kontaktowych sąsiadujących ze sobą warstw konstrukcyjnych (komórek wypełnionych materiałem zasypowym) jest większa od wytrzymałości na ścinanie samego materiału zasypowego, b) właściwości

wytrzymałościowe systemów geokomórkowych silnie zależą od rodzaju i parametrów materiału zasypowego, zwłaszcza od stosunku wielkości uziarnienia zasypki do wymiaru komórek, c) wprowadzenie specjalnych elementów łącznikowych w postaci syntetycznych przewiązek między poziomymi warstwami systemu nadaje całemu ośrodkowi nowe właściwości. Łączniki modyfikują zachowanie się konstrukcji oporowej pod obciążeniem – ośrodek o więzach jednostronnych nabiera właściwości materiału quasi-monolitycznego. Przedmiotem badań było tworzywo w postaci geokraty komórkowej wypełnionej sześcioma rodzajami zasypek (piasek średni, kruszywa frakcjonowane  $2\div 8$ ,  $8\div 16$  i  $16\div 32$  mm, kamień łamany oraz keramzyt geotechniczny). W celu realizacji badań zaprojektowano i zbudowano unikatowe stanowisko badawcze w postaci wielkowymiarowego aparatu bezpośredniego ścinania o wymiarach komory  $100 \times 100 \times 48$  cm. Przeprowadzone badania wykazały, że wytrzymałość na ścinanie w strefie kontaktowej warstw konstrukcyjnych może być większa od wytrzymałości na ścinanie samego materiału zasypowego. Stwierdzono, że zależy ona od uziarnienia zasypki, tj. stosunku średnicy ziarn do wymiaru komórek. Wykazano też, że wprowadzenie łączników pomiędzy leżącymi na sobie warstwami konstrukcyjnymi w istotny sposób wpłynęło na zwiększenie oporów tarcia w strefie kontaktowej. Wyniki przeprowadzonych badań potwierdziły stawiane w pracy tezy badawcze. W pracy zamieszczono również przykład obliczania i wymiarowania konstrukcji z uwzględnieniem uzyskanych wcześniej rezultatów badań.

### 3. Opis wielkowymiarowego aparatu bezpośredniego ścinania

Wielkowymiarowy aparat bezpośredniego ścinania (WABS) pokazany na fot. 3 służy do badań wytrzymałości na ścinanie materiałów sypkich: naturalnych gruntów gruboziarnistych, kruszyw skalnych, keramzytu geotechnicznego itp. Ponadto pozwala na wyznaczanie parametrów ciernych pomiędzy gruntem a geosyntetykiem. Znajomość tych parametrów jest niezbędna do projektowania konstrukcji z gruntu zbrojonego.



Fot. 3. Widok WABS od strony stanowiska sterowania na pozycji badania: 1 – skrzynia aparatu na pozycji badania, 2 – napęd stanowiska, 3 – siłownik hydrauliczny do zadawania obciążeń pionowych, 4 – stanowisko sterowania, 4a – GEODATALOG, 4b – sterownik prasy Schenck, 4c – sterownik napędu stanowiska

Charakterystyka techniczna aparatu WABS jest następująca:

- wymiary komory badawczej  $1000$  ( $1200$ )  $\times$   $1000 \times 480$  mm,
- objętość załadunkowa ok.  $0,45$  ( $0,54$ )  $m^3$ ,
- stała prędkość ścinania regulowana w zakresie od  $0,2$  do  $2$  mm/min; prędkość powrotu na biegu jałowym  $12$  mm/min,
- maksymalna siła pozioma  $H = 200$  kN,
- maksymalna siła pionowa  $N = 200$  kN (teoretyczna  $630$  kN – maksymalny nacisk prasy Schenck),
- system wibracyjny zagęszczania materiału,

- oprzyrządowanie pomiarowe stanowi moduł GEODATALOG, firmy Wykeham Farrance, wraz z przetwornikami peryferyjnymi: tensometrycznymi przetwornikami sił klasy 0,5 (0-200 kN) i potencjometrycznymi przetwornikami drogi o zasięgu od 50 do 100 mm i dokładności  $\pm 0,002$  mm.

W przypadku oznaczania wytrzymałości na ścinanie metodyka prowadzenia badań na tym stanowisku jest podobna jak dla klasycznego (małego) aparatu bezpośredniego ścinania, zgodnego z normami PKN-CEN ISO/TS 17892-10:2009, ASTM D3080 czy BS 1377-7:1990.

Dla zwiększenia uniwersalności budowanego stanowiska badawczego niektóre jego cechy zaprojektowano w taki sposób, że już teraz można WABS wykorzystać do wyznaczania właściwości ciernych szerokiej gamy różnych geosyntetyków w badaniu bezpośredniego ścinania przy stałej powierzchni kontaktu (zgodnie z wymogami PN-EN ISO 12957-1).

W dalszej perspektywie, po wprowadzeniu nieznacznych modyfikacji, stanowisko może zostać przystosowane do wyznaczania oporu na wyciąganie geosyntetyku z gruntu (według PN-EN 13738, ASTM D6706). Za oryginalne rozwiązanie należy też uznać przyjęty sposób wibracyjnego zagęszczania materiału zasypowego przez parę elektrowibratorów zamocowanych na dwóch równoległych bokach dolnej ramy spoczywającej na sprężynach elastomerowych.

#### **4. Możliwość obiektywizacji oznaczania stopnia plastyczności na przykładzie glin lodowcowych występujących na terenie Poznania i okolic**

Na terenie Wielkopolski i ogólnie Niżu Polskiego w podłożu budowlanym występują głównie grunty spoiste będące przeważnie gruntami polodowcowymi. Wykształcenie takie związane jest z historią geologiczną tego obszaru. Na powierzchni odślaniają się najczęściej gliny polodowcowe (zlodowaceń północno- i środkowopolskich). W związku z powyższym większość prac geotechnicznych i robót fundamentowych dotyczy podłoża zbudowanego z gruntów spoistych w postaci glin lodowcowych. Precyzyjne oznaczenie parametrów tych gruntów oraz korelacja ich wartości wyznaczanych różnymi metodami to ważne zadania współczesnej geologii inżynierskiej [15, 16, 17].

Stopień plastyczności ( $I_L$ ) jest parametrem wiodącym dla gruntów spoistych. Określa on stan fizyczny, w jakim znajduje się grunt, oraz wykazuje wyraźne i ważne korelacje z parametrami wytrzymałościowymi podłoża. W polskiej praktyce inżynierskiej wykorzystuje się wartość stopnia plastyczności do wyznaczania wielu parametrów geotechnicznych metodą pośrednią, tj. na podstawie istniejących zależności korelacyjnych, a nie na podstawie wyników badań laboratoryjnych czy terenowych. Metodę tę stosuje się powszechnie dla mniej skomplikowanych obiektów budowlanych posadowionych w mniej złożonych warunkach gruntowo-wodnych. Za pomocą tej metody wyznaczyć można takie parametry gruntu, jak: gęstość objętościową ( $\rho$ ), kąt tarcia wewnętrznego ( $\Phi$ ), spójność ( $c$ ), wytrzymałość na ścinanie ( $\tau_f$ ) przy zadanym naprężeniu normalnym, moduł pierwotnego odkształcenia ( $E_0$ ) czy edometryczny moduł ściśliwości pierwotnej ( $M_0$ ). W celu wyznaczania wartości stopnia plastyczności stosuje się metody laboratoryjne, wówczas niezbędne jest oznaczenie wartości granic płynności ( $w_L$ ) i plastyczności ( $w_p$ ) oraz wilgotności naturalnej gruntu ( $w_n$ ) lub terenowe.

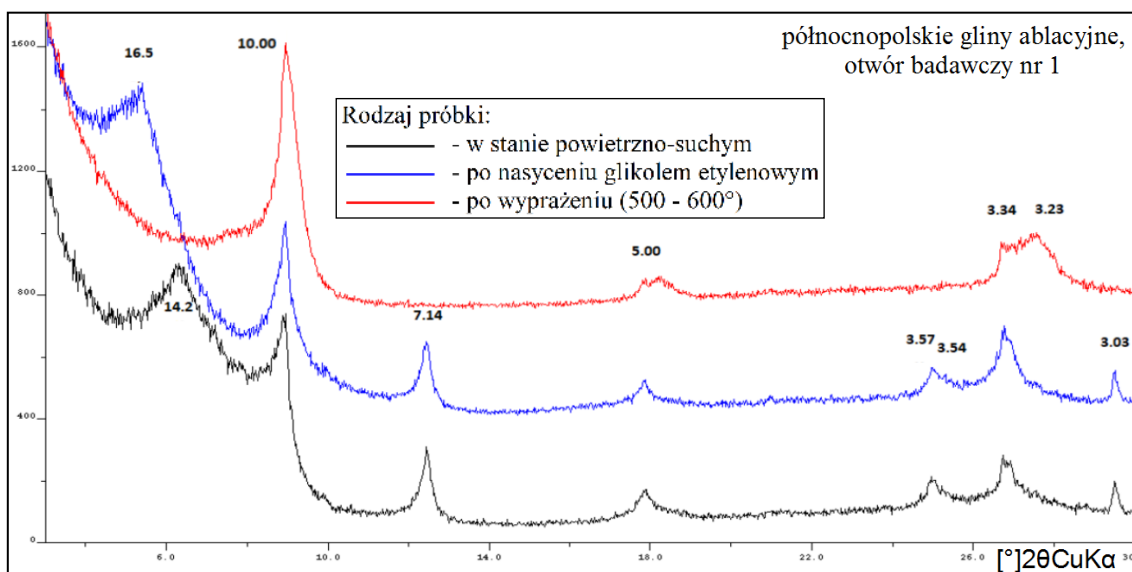
Celami naukowymi prac prowadzonych w Zakładzie Geotechniki i Geologii Inżynierskiej były m.in. próba obiektywizacji i skrócenia czasu oznaczania wartości stopnia plastyczności w laboratorium oraz utworzenie korelacji na poziomie lokalnym (dla ściśle określonych rodzajów gruntu) pomiędzy wartościami tego parametru wyznaczanymi różnymi metodami. Przyjęto założenie, że cel zostanie osiągnięty po zrealizowaniu następujących zadań badawczych:

1. Porównaniu laboratoryjnych metod i wyników oznaczania wartości granicy płynności ( $w_L$ ) – metodą penetrometru stożkowego wg zasad Polskiej Normy (PN-88/B-04481. Grunty budowlane) oraz Eurokodu (PN-EN 1997-2: 2009. Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne) przy użyciu dwóch rodzajów stożków – 30°/80g i 60°/60g oraz aparatu Casagrande (PN-88/B-04481).
2. Sprawdzeniu możliwości oznaczenia wartości granicy plastyczności ( $w_p$ ) przy użyciu penetrometru stożkowego.
3. Przetestowaniu alternatywnej metody oznaczania wartości stopnia plastyczności ( $I_L$ ) z pominięciem badań granic konsystencji i ewentualnej modyfikacji tej metody.
4. Porównaniu wartości granicy płynności uzyskiwanych tzw. metodami jednopunktowymi i przetestowaniu autorskiej metody oznaczania  $w_L$  metodą dwupunktową.

Fizykomechaniczne właściwości gruntów spoistych zależą przede wszystkim od ich pochodzenia, które ukształtowało strukturę i teksturę osadu, jego skład mineralno-petrograficzny oraz stopień konsolidacji. Znajomość genezy i historii geologicznej badanych glin jest ważnym elementem kompleksowej oceny tych gruntów jako podłoża budowlanego. W związku z powyższym wymienione zadania badawcze wykonano

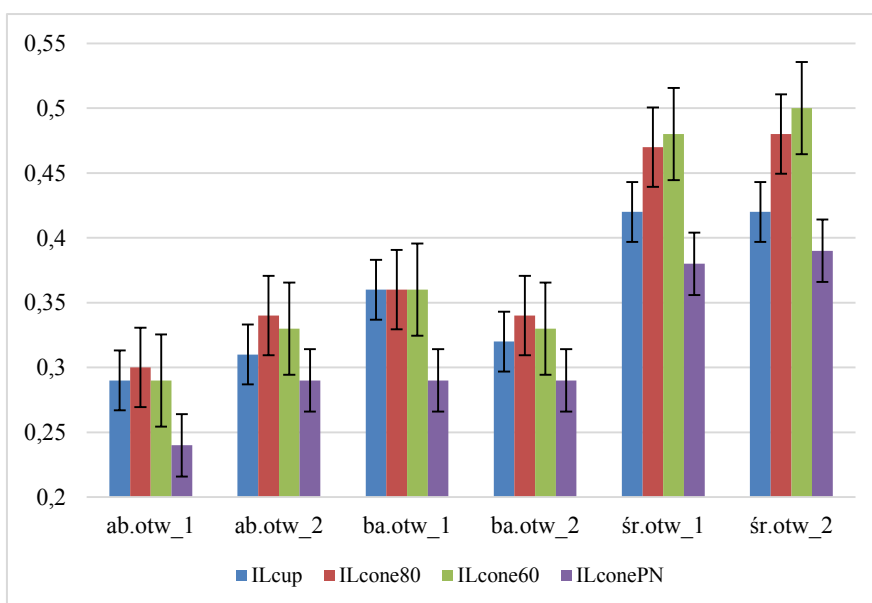


dla trzech rodzajów gruntów spoistych różniących się od siebie wiekiem i wykształceniem facjalnym. Kolejnym z celów pracy badawczej jest bowiem sprawdzenie, czy cechy genetyczne gruntu (np. wiek, facja, skład mineralny frakcji iltowej) mają znaczący wpływ na uzyskiwane wartości parametrów geotechnicznych (rys. 1) oraz czy zależności korelacyjne pomiędzy tymi wartościami uzyskiwanymi różnymi metodami laboratoryjnymi są podobne dla różnych rodzajów gruntu.



Rys. 1. Dyfraktogram rentgenowski północnopolskich glin ablacyjnych

Zakłada się, że dla wybranych gruntów spoistych (ściśle określonych pod względem genetycznym, facjalnym) możliwe jest wyznaczenie statystycznie uzasadnionej korelacji pomiędzy stopniem plastyczności wyznaczonym różnymi metodami normowymi (rys. 2). Taką samą zależność można wyznaczyć pomiędzy wartością stopnia plastyczności a wartością parametru uproszczonego, którego procedura oznaczania jest mniej subiektywna i daje stabilniejsze wyniki (rys. 3). Przyjmuje się również, że wspomniane zależności korelacyjne różnią się w zależności od rodzaju badanego gruntu (jego wieku, facji, w której został wykształcony, cech strukturalno-teksturalnych).



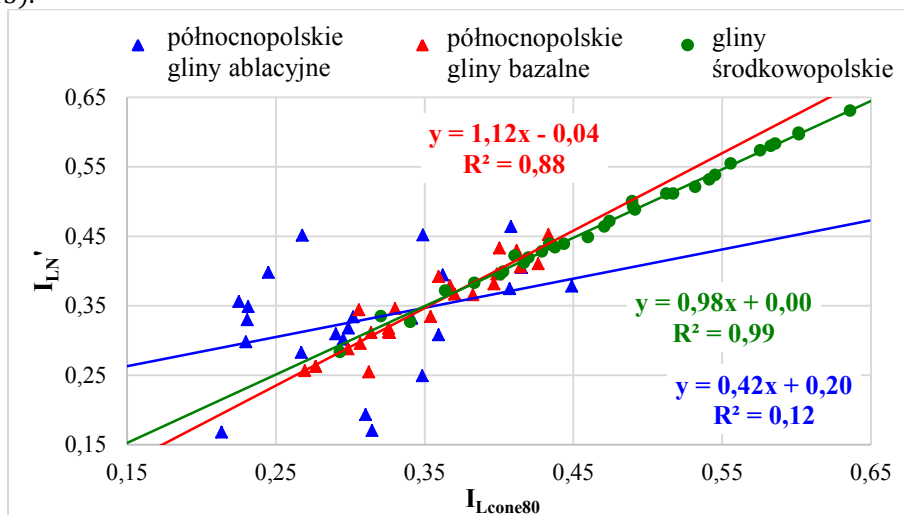
Rys. 2. Graficzne przedstawienie średnich wartości stopnia plastyczności oznaczonego czterema różnymi metodami standardowymi (ab.otw\_1 – północnopolskie gliny ablacyjne z otworu badawczego nr 1; ab.otw\_2 – północnopolskie gliny ablacyjne z otworu badawczego nr 2; ba.otw\_1 – północnopolskie gliny bazalne z otworu

*badawczego nr 1; ba.otw\_2 – północnopolskie gliny bazalne z otworu badawczego nr 2; śr.otw\_1 – gliny środkowopolskie z otworu badawczego nr 1; śr.otw\_2 – gliny środkowopolskie z otworu badawczego nr 2*

Można ponadto oczekiwać, że dla omawianych gruntów istnieje możliwość opracowania nowej, wolnej od błędu subiektywności, metody oznaczania granicy plastyczności. Ostatecznie założono, że w celu skrócenia czasu potrzebnego na przeprowadzenie testu przy zachowaniu odpowiedniej precyzji w badaniach laboratoryjnych procedurę oznaczania granicy płynności da się uprościć.

Przedmiotem badań były północnopolskie gliny lodowcowe fazy leszczyńskiej oraz środkowopolskie gliny lodowcowe jako grunty, które mają wychodnie na stosunkowo dużym obszarze Wielkopolski, a co za tym idzie – często stanowią podłoże budowlane. Teren badawczy to północna część Poznania i jej okolice.

Omawiane gliny północnopolskie wg Polskiej Normy (PN-86/B-02480. Grunty budowlane) wykształcone są w postaci glin piaszczystych (*Gp*), rzadziej piasków gliniastych (*Pg*), i glin piaszczystych zwięzłych (*Gpz*). Według europejskiego systemu normalizacyjnego (PN-EN ISO 14688-1:2006. Badania geotechniczne) zaliczane są natomiast do iłów z piaskiem i pyłem (*sisaCl*), iłów z pyłem i piaskiem (*sasiCl*) i piasków z łem i pyłem (*siclSa*). Charakterystyczne cechy omawianych gruntów to silne spiaszczenie oraz niewielka domieszka frakcji żwirowej w każdej próbce. Omawiane gliny zaliczane są głównie do gruntów średnio spoistych, ale również do mało i zwięzła spoistych, w których zawartość frakcji iłowej zawiera się w przedziale 8÷21%. Głównymi składnikami ilastymi glin najmłodszego zlodowacenia są illit, kaolinit oraz minerały mieszanopakietowe typu smektyt/illit odznaczające się niską i średnią hydrofilnością. We frakcji iłowej omawianych gruntów stwierdzono również występowanie cząstek kwarcu. Wilgotność naturalna badanych glin mieści się w zakresie 12÷17%. Występują one głównie w stanie plastycznym, rzadziej twaroplastycznym (wartość stopnia plastyczności wynosi 0,18÷0,43).



Rys. 3. Zależności korelacyjne pomiędzy wartością stopnia plastyczności oznaczonego w sposób normowy na podstawie badań w penetrometrze stożkowym przy użyciu stożka 30°/80g ( $I_{Lcone80}$ ) a wartością stopnia plastyczności obliczonego na podstawie granicy plastyczności oznaczonej w penetrometrze stożkowym przy użyciu stożka 30°/80g z dodatkowym obciążnikiem ( $I_{LN}'$ )

Na omawianym terenie badań gliny najmłodszego zlodowacenia tworzą wyraźnie dwudzielny kompleks. Grunty położone od powierzchni terenu do około 4-5 m p.p.t. są żółto-brązowe, o strukturze pseudowarstwowej, natomiast głębiej do około 7-9 m p.p.t. mamy do czynienia z glinami barwy brunatnej, o strukturze masywnej, homogenicznej. Badania wykazały, że można je zaliczyć odpowiednio do glin ablacyjnych i bazalnych. Przesłanką świadczącą o przynależności facjalnej badanych gruntów jest m.in. skład mineralno-petrograficzny frakcji żwirowej. W glinach ablacyjnych dominuje materiał z dalekiego transportu, a więc głównie fragmenty skał skandynawskich. W glinach bazalnych mamy do czynienia z większą ilością skał pochodzenia lokalnego, co jest wytłumaczalne ze względu na sposób transportu materiału subglacjalnego.

Gliny środkowopolskie (tzw. gliny szare) wg Polskiej Normy (PN-86/B-02480) wykształcone są w postaci glin piaszczystych (*Gp*), rzadziej piasków gliniastych (*Pg*). Natomiast wg europejskiego systemu normalizacyjnego (PN-EN ISO 14688-1:2006) zaliczane są one do iłów z piaskiem i pyłem (*sisaCl*), a niekiedy do piasków z łem i pyłem (*siclSa*). Podobnie jak grunty młodsze gliny środkowopolskie charakteryzują się niewielką domieszką frakcji żwirowej we wszystkich próbkach oraz

ilościową dominacją frakcji piaszczystej. Grunty te są natomiast bardziej jednorodne pod względem zawartości frakcji ilowej (9÷16%). Głównymi składnikami zawartymi we frakcji najdrobniejszej są illit, kaolinit i chloryt pęczniejący. Wilgotność naturalna glin środkowopolskich jest nieco niższa od wilgotności glin młodszego zlodowacenia i wynosi ok. 12÷15%. Znacznie wyższe są tu natomiast wartości stopnia plastyczności (od 0,24 do 0,63), co oznacza, że omawiane gliny szare znajdują się w stanie plastycznym i miękkoplastycznym, rzadziej twardoplastycznym (PN-86/B-02480). Gliny środkowopolskie występujące na badanym terenie mają barwę ciemnoszarą, są homogeniczne, masywne, bez jakichkolwiek przewarstwień czy soczew.

W związku z podanym rozpoznaniem geologicznym badania prowadzi się w podziale na gliny północnopolskie (ablacyjne i bazalne) oraz gliny środkowopolskie. Podczas wieloaspektowych badań stopnia plastyczności wyniki uzyskane z tych glin stanowiły trzy osobne zbiory danych.

## **5. Analiza wpływu dodatku mleczanu diamidoaminy na wytrzymałość na ściskanie i mrozoodporność gruntów mało i średnio spoistych stosowanych w budownictwie drogowym**

W budownictwie drogowym wymaga się, aby podłoże było niewysadzinowe. W przypadku gruntów spoistych, w których odprowadzenie wody w głąb – z uwagi na drobne uziarnienie i niską przepuszczalność – nie jest możliwe, zwiększające się kryształy lodu powodują podniesienie warstwy gruntu. Jednym z najbardziej efektywnych sposobów wzmacniania podłoża gruntowego jest stabilizacja cementem gruntów niespoistych. Stabilizacja gruntów spoistych – z uwagi na zmianę stanu pod wpływem zwiększenia ilości wody – jest zjawiskiem niepopularnym. Ochrona warstw spoistych przed wnikaniem wody jest aktualnym zagadnieniem naukowym.

Badania przeprowadzono na wybranych gruntach: mało i średnio spoistych, które często występują w bezpośrednim podłożu konstrukcji nawierzchni drogowych. Wybrane grunty stabilizowano cementem powszechnego użytku oraz dwoma komercyjnymi spoiwami hydraulicznymi. Jako dodatek hydrofobizujący do mieszanek stabilizowanych cementem zastosowano materiał pochodzenia organicznego [1, 2, 3]. Zastosowany w badaniach mleczan diamidoaminy został wyprodukowany i dostarczony przez Instytut Ciężkiej Syntezy Organicznej „Błachownia” z Kędzierzyna-Koźła. Środek hydrofobizujący stanowiący dodatek do gruntów stabilizowanych cementem składa się z tłuszczów pochodzenia odpadowego (m.in. zużytych olejów posmażalniczych i tłuszczów zwierzęcych).

Celem badań była ocena wpływu dodatku mleczanu diamidoaminy na poprawę wytrzymałości na ściskanie i mrozoodporności wybranych gruntów spoistych stosowanych w budownictwie drogowym.

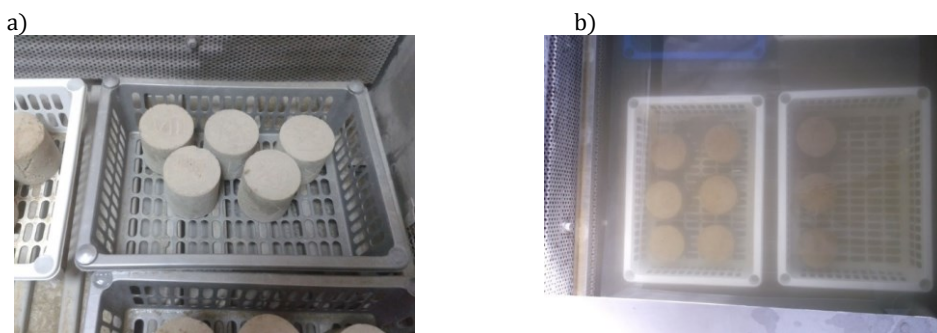
### **5.1. Prace badawcze**

Szereg kompleksowych badań stanowiły: badania materiałów – gruntów, spoiw oraz dodatku hydrofobizującego. Szczegółowej analizie poddano mieszanki gruntu stabilizowane cementem oraz mleczanem diamidoaminy – m.in. oznaczając ich wytrzymałość na ściskanie (fot. 4), określając wskaźniki mrozoodporności (fot. 5) oraz nasiąkliwość i kapilarną absorpcję wody (fot. 6).

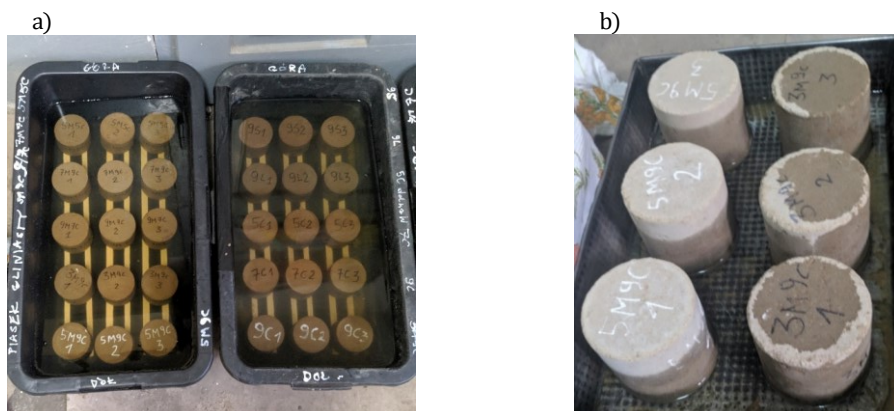




Fot. 4. Oznaczenie wytrzymałości na ściskanie przy zastosowaniu maszyny wytrzymałościowej



Fot. 5. Badanie mrozoodporności w komorze: a) cykl mrożenia, b) cykl odmrażania w wodzie



Fot. 6. Laboratoryjne badania: a) nasiąkliwości, b) kapilarnej absorpcji wody

## 5.2. Wybrane rezultaty prac

W celu porównania uzyskiwanych wartości wytrzymałości na ściskanie po zastosowaniu różnych spoiw wyznaczono parametr skuteczności działania środków do stabilizacji. Miarą skuteczności jest przyrost wytrzymałości na ściskanie badanych próbek stabilizowanych cementem i dodatkiem hydrofobizującym lub alternatywnymi spoiwami w odniesieniu do próbek referencyjnych (stabilizowanych wyłącznie cementem). Jako wartość 1,00 przyjęto wyniki oznaczenia wytrzymałości na ściskanie uzyskane dla próbek referencyjnych. Wartości powyżej 1,00 świadczą o wyższej, a wartości poniżej 1,00 świadczą o niższej skuteczności działania stabilizatora (cementu z dodatkiem mleczanu diamidoaminy lub wybranych spoiw hydraulicznych) w uzyskanej wytrzymałości na

ściskanie. Wartości zilustrowano na rysunkach 4 i 5. Wyniki badania mrozoodporności uzyskane przez poszczególne mieszanki przedstawiono na tablicach 1-3.

Tablica 1. Wartości wskaźników mrozoodporności wybranych mieszanek Pg i Gp stabilizowanych badanymi spoiwami

Ilość spoiwa		Piasek gliniasty						Gлина piaszczysta					
		7%C	7%L	7%S	9%C	9%L	9%S	7%C	7%L	7%S	9%C	9%L	9%S
Wskaźnik mrozoodporności	R <sup>M</sup> <sub>28</sub>	0,52	0,42	0,20	0,54	0,57	0,57	0,06	0,27	0,31	0,10	0,14	0,16
	R <sub>28</sub>												
C – dodatek cementu, L – dodatek spoiwa lipidur, S – dodatek spoiwa silment													

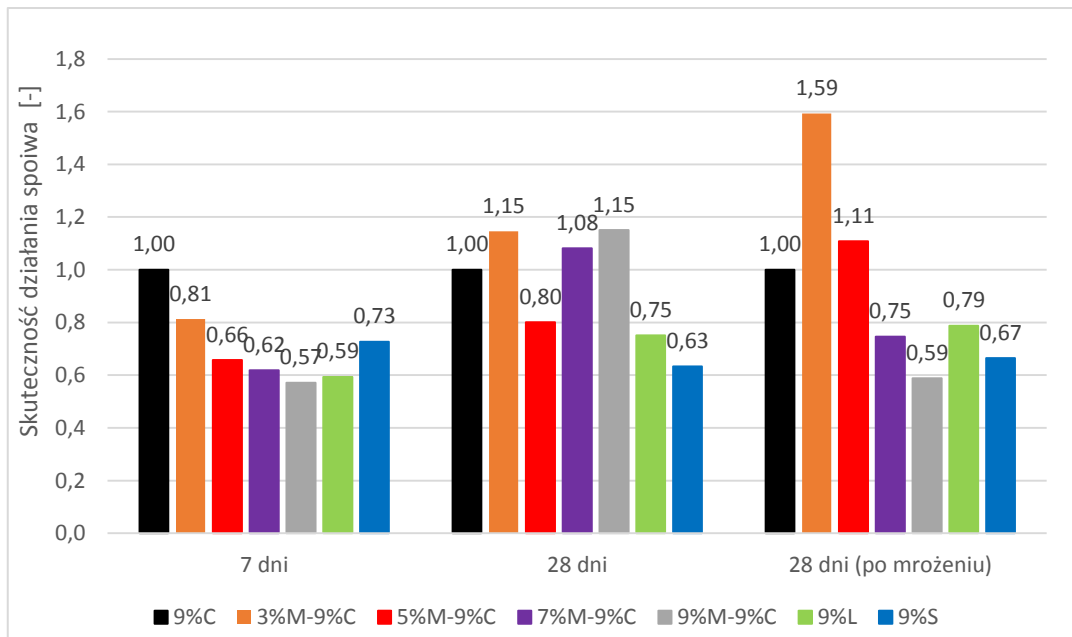
Tablica 2. Wartości wskaźników mrozoodporności wybranych mieszanek Pg stabilizowanych cementem i mleczanem

Ilość spoiwa		3% cement	5% cement	7% cement	9% cement
		1%M-3%C	5%M-5%C	7%M-7%C	3%M-9%C
Wskaźnik mrozoodporności	R <sup>M</sup> <sub>28</sub>	0,15	0,27	0,35	0,76
	R <sub>28</sub>				
M – dodatek mleczanu diamidoaminy, C – dodatek cementu					

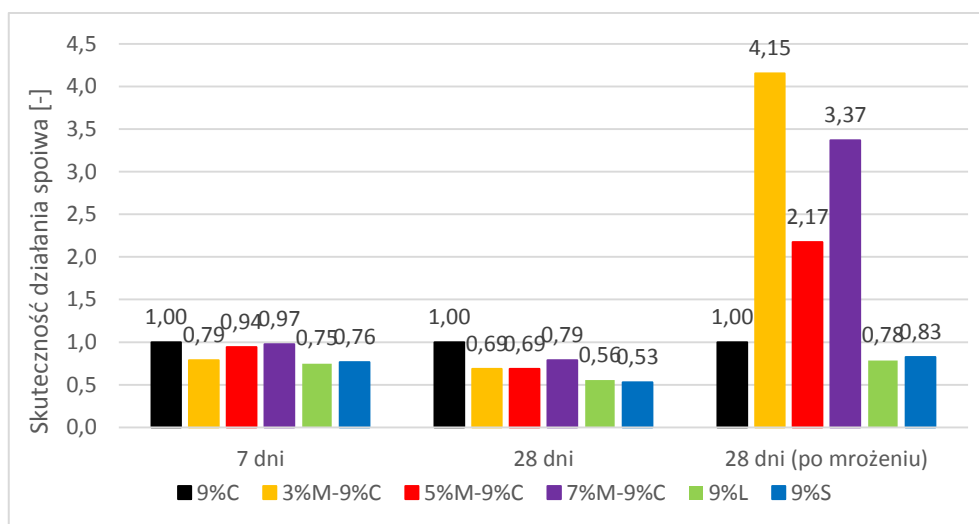
Tablica 3. Wartości wskaźników mrozoodporności wybranych mieszanek Gp stabilizowanych cementem i mleczanem

Ilość spoiwa		7% cement		9% cement	
		3%M-7%C	5%M-7%C	3%M-9%C	5%M-9%C
Wskaźnik mrozoodporności	R <sup>M</sup> <sub>28</sub>	0,54	0,34	0,61	0,32
	R <sub>28</sub>				
M – dodatek mleczanu diamidoaminy, C – dodatek spoiwa – cementu					

Spośród badanych mieszanek piasku gliniastego z 9% zawartością dodatku spoiwa dla próbek poddanych mrożeniu najwyższą wartość wytrzymałości uzyskała mieszanka 3%M-9%C. Wymagany poziom mrozoodporności (>0,6) uzyskały dwie mieszanki: 3%M-9%C i 5%M-9%C. W przypadku gliny piaszczystej i dodatku spoiwa w ilości 9%, w badaniach mrozoodporności, najlepsze parametry wykazały dwie mieszanki: 3%M-9%C oraz 7%M-9%C, jednak żadne z zastosowanych spoiw i dodatków nie pozwoliło na osiągnięcie wymaganego poziomu mrozoodporności.



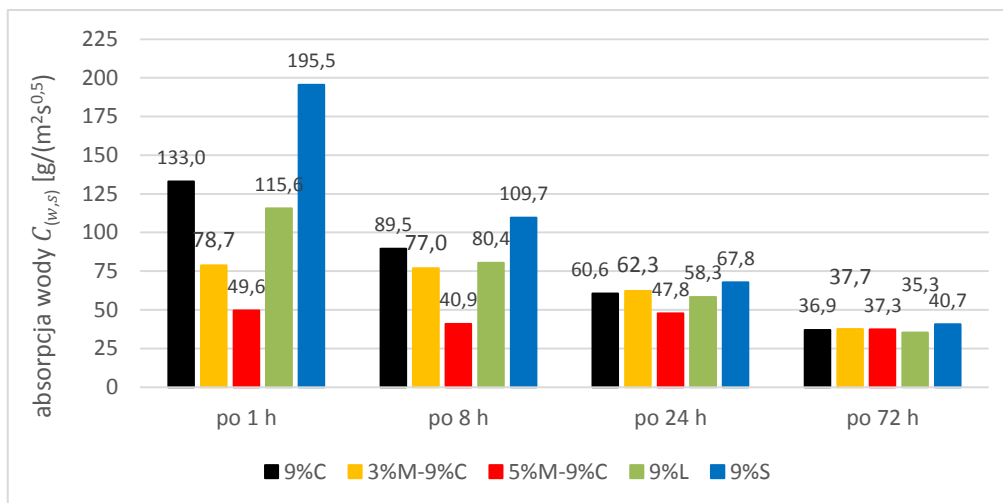
Rys. 4. Skuteczność działania badanych spoiw w ilości 9% dodanych do piasku gliniastego



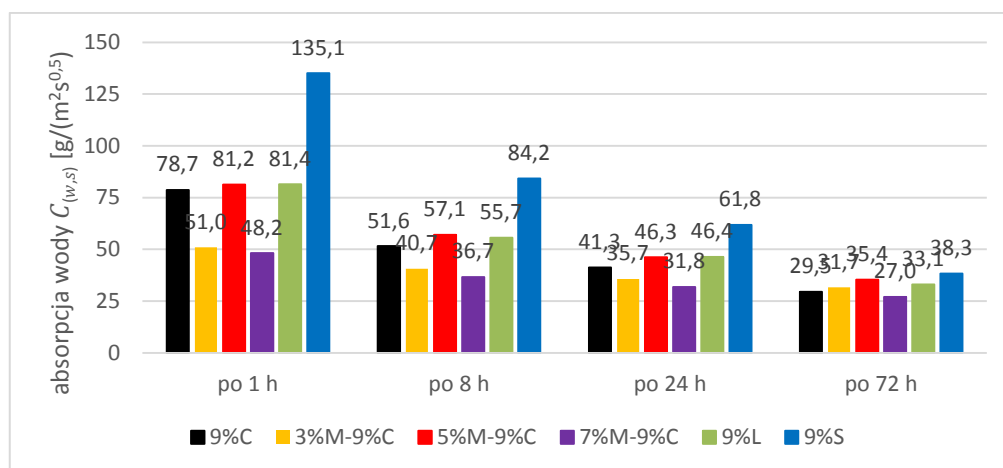
Rys. 5. Skuteczność działania badanych spoiw w ilości 9% dodanych do gliny piaszczystej

Dla 9% dodatku spoiwa zarówno w przypadku mieszanek gliny piaszczystej, jak i piasku gliniastego najwyższą skuteczność uzyskano dla próbek poddanych mrożeniu, dla mieszanek z dodatkiem 9% cementu oraz 3% mleczanu diamidoaminy. Żadne z dodanych spoiw nie poprawia skuteczności zwiększenia wytrzymałości na ściskanie oznaczanej po 7 dniach w przypadku obu badanych gruntów. Dodatek mleczanu diamidoaminy pozwala na poprawę wytrzymałości po 28 dniach twardnienia jedynie w przypadku piasku gliniastego. Dodatek spoiw komercyjnych lipidur lub silment w ilości 9% nie pozwala na uzyskanie większej wytrzymałości na ściskanie niż ta sama ilość cementu.

Poza badaniami wytrzymałości na ściskanie i mrozoodporności w celu sprawdzenia hydrofobizujących właściwości mleczanu diamidoaminy przeprowadzono badania nasiąkliwości oraz kapilarnej absorpcji wody. Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono wartości kapilarnej absorpcji wody dla wybranych okresów podciągania.



Rys. 6. Wartości kapilarnej absorpcji wody mieszanek Pg z 9% dodatkiem badanych spoiw



Rys. 7. Wartości kapilarnej absorpcji wody mieszanek Gp z 9% dodatkiem badanych spoiw

Przedstawione wyniki pozwalają jednoznacznie stwierdzić, że dodatek mleczanu diamidoaminy ogranicza możliwość kapilarnego podciągania wody w odniesieniu do gruntów stabilizowanych wyłącznie cementem, szczególnie w początkowym okresie absorpcji (do 8 h). W późniejszym okresie badania, gdy próbka już nasyci się wodą, ilość podciąganej kapilarnie wody jest wartością porównywalną dla wszystkich mieszanek. Największą zdolnością do kapilarnej absorpcji wody charakteryzują się mieszanki stabilizowane spoiwem silment.

Zróznicowaną absorpcję wody w zależności od rodzaju spoiwa i ilości dodatku mleczanu diamidoaminy można zaobserwować na fotografii 7.



Fot. 7. Badanie kapilarności mieszanki gliny piaszczystej – widok po 24 h od zanurzenia

### 5.3. Podsumowanie

Przeprowadzone badania miały na celu określenie wpływu działania hydrofobizującego dodatku organicznego pochodzenia na mieszanki wybranych gruntów spoistych stabilizowanych cementem. Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz należy stwierdzić, że:

1. Dodatek mleczanu diamidoaminy w ilości 1%-5% w odniesieniu do masy gruntu powoduje zwiększenie wytrzymałości na ściskanie i zwiększenie mrozoodporności mieszanek gruntu mało spoistego.
2. Hydrofobizujące działanie mleczanu diamidoaminy zostało potwierdzone badaniami kapilarnej absorpcji wody. Dodatek ww. środka pozwolił na ograniczenie możliwości wnikania wody zarówno w przypadku mieszanek piasku gliniastego, jak i gliny piaszczystej. Większą skuteczność stwierdzono w przypadku mieszanek piasku gliniastego.
3. Dodatek samego cementu do gruntu spoistego nie pozwala uzyskać przez mieszankę wartości wytrzymałości oraz wskaźnika mrozoodporności odpowiadających wymaganiom normowym ( $>0,6$ ), co pozwala stwierdzić, że stabilizacja piasków gliniastych i glin piaszczystych wyłącznie cementem nie jest efektywna.
4. Dodatek cementu w ilości 7%-9% oraz mleczanu diamidoaminy w ilości do 5% zwiększa wytrzymałość na ściskanie stabilizowanych gruntów spoistych zarówno po miarodajnym okresie 28 dni twardnienia, jak i po 14-dniowej próbie mrożenia.
5. Zastosowanie dodatku mleczanu diamidoaminy zmniejsza wartość kapilarnego podciągania wody z otoczenia, co pozwala na ograniczenie tworzenia się soczewek wodnych w gruntach spoistych i zwiększa ich odporność na powstanie wysadzin.

## 6. Pozostałe badania prowadzone w Zakładzie Geotechniki, Geologii Inżynierskiej i Geodezji

Pracownicy ZGGIiG wzięli również udział w bardzo skomplikowanych i nowatorskich rozwiązaniach projektowych [30, 31], do których m.in. należy projekt posadowienia wysokiego nasypu na podłożu słabonośnym (torf, gytia) do ok. 18 m głębokości wraz z projektem lekkiego nasypu drogowego zbudowanego z keramzytu dla odciążenia pali [41].

W zakresie prowadzonych badań znajdują się także analiza współpracy podłoża gruntowego z konstrukcją, oddziaływanie konstrukcji na podłoże gruntowe i sąsiadujące obiekty, analizy złożonych zagadnień geotechnicznych przy użyciu metody elementów skończonych, opisywanie zachowania gruntu modelami konstytutywnymi oraz kalibracja tych modeli [13]. W rozszerzonym zakresie realizowana jest obecnie praca doktorska pt. „Ocena odkształceń wybranych gruntów spoistych wyznaczonych za pomocą analizy wstecznej z zastosowaniem metody elementów skończonych” poszerzająca dotychczasowy zakres badań o takie zagadnienia, jak: teoria plastyczności, modele konstytutywne, mechanika gruntów w programach do komputerowej analizy problemów geotechnicznych, metoda elementów skończonych oraz kalibracja modeli konstytutywnych za pomocą analizy wstecznej.

W Laboratorium Mechaniki Gruntów należącym do ZGGIiG, w ramach kolejnej pracy doktorskiej, prowadzone są również badania nad sufozyjnością kruszyw, głównie piasków o wysokim wskaźniku



różnoziarnistości [7]. Piaski uważane są powszechnie za grunty bardzo przydatne w budownictwie oraz niestanowiące w podłożu budowlanym żadnych zagrożeń. Tymczasem można znaleźć przykłady awarii budowlanych wynikających z wypłukiwania drobnych cząstek mineralnych z podłoża przez niespodziewanie pojawiającą się wodę, co zwykle wywołuje nieprzewidziane osiadania, dlatego prowadzone badania podatności piasków na sufozję wykonywane w specjalnie skonstruowanym urządzeniu (fot. 8) dobrze wpisują się w potrzeby rynku.

Wśród pozostałych działań naukowych związanych z analizą warunków gruntowo-wodnych należy wymienić badania nad wpływem roślinności, a w szczególności drzew na zmiany stanu gruntów spoistych występujących w podłożu budowlanym. Analiza przyczyn i znajdowanie rozwiązań dla różnego rodzaju awarii budowlanych, których przyczyny można upatrywać w zachwianiu równowagi gruntowo-wodnej wynikającej z nasadzenia bądź wycinki drzewostanów, świetnie wpisują się w związek budownictwa z ekologią.

W ZGGiG, przy współpracy z innymi jednostkami naukowymi (m.in. PAN – Oddział Wrocław, Politechniką Gdańską i UKW w Bydgoszczy) prowadzone są również badania stricte geologiczne z zakresu petrologii i geochemii. Wpisują się one także w aktualną tematykę dotyczącą zmian klimatycznych i zanieczyszczenia litosfery (badania związane z interpretacją analiz geochemicznych osadów z Wyspy Króla Jerzego w Antarktyce [34] oraz profilem geochemicznym systemów rzeczno-jeziornych Doliny Jezior w Mongolii [37, 38]. W Zakładzie prowadzone są też badania dotyczące petrologii i geochemii skał magmowych, analizy typologicznej cyrkonów oraz analizy strukturalnej i tektonicznej w odniesieniu do paleogeografii mikropląt i terranów z obszaru polskich i czeskich Sudetów [12]. Badania geochemiczne skał magmowych prowadzone były również w latach 2008-2010 na terenie centralnej Mongolii. Obok klasycznej petrologii dotyczyły one wówczas mineralizacji pierwiastków ziem rzadkich związanej z granitami typu A, które w Polsce na powierzchni nie występują [20, 21, 22, 27].



Fot. 8. Aparat do badania sufozyjności gruntów

Pracownicy Zakładu Geotechniki, Geologii Inżynierskiej i Geodezji wspierani są również przez matematyka prowadzącego swoją odrębną działalność naukową [5, 14, 19, 18], który m.in. konsultuje poprawność stosowania metod statystycznych powszechnie używanych w obróbce wyników analiz laboratoryjnych.

## Literatura

- [1] Babiak M., Kosno J., Węgliński S., Ekologiczny środek do stabilizacji gruntów spoistych zwiększający ich wytrzymałość i mrozoodporność, „Materiały Budowlane” 2017, nr 2, s. 24-26.
- [2] Babiak M., Ratajczak A., Ratajczak M., Węgliński S., Assessment of resistance to fragmentation of crushed-stone aggregate for the application in road engineering, „Materials Science Forum” 2018, vol. 923, s. 120-124.

- [3] Babiak M., Węgliński S., Wiśniewski Ł., Wpływ domieszek hydrofobizujących na właściwości betonu cementowego używanego w konstrukcjach inżynierskich, „Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej” 2018, nr 26, s. 19-32.
- [4] Bilski M., Machowiak K., Wilmański A., Wpływ właściwości fizykochemicznych kruszyw mineralnych na adhezję lepiscza asfaltowego do ich powierzchni. W: Przyrodnicze i geotechniczne aspekty budownictwa, red. A. Duda, M. Flieger-Szymańska, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2020, s. 33-46.
- [5] Carkovs J., Andrejs Matvejevs A., Aleksandrs Matvejevs A., Kubzdela A., Stochastic modeling for transport Logistics, „Procedia Computer Science” 2019, 149, pp. 457-462.
- [6] Duda A., Nowak M., Stabilizacja i zabezpieczenie wybranego odcinka Klifu Orłowskiego. W: Przyrodnicze i geotechniczne aspekty budownictwa, red. A. Duda, M. Flieger-Szymańska, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2020, s. 71-84.
- [7] Filipowicz B., Florkiewicz A., Zjawisko i sposoby zapobiegania sufozji, „Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej” 2011, 9, s. 151-164.
- [8] Flieger-Szymańska M., Machowiak K., Krawczyk D., Wanatowski D., Characterization of mineral composition and strength parameters of varved clays. W: XVII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering – Reykjavik, Iceland, 1-6 September 2019, „Geotechnical Engineering – foundation of the future: conference proceedings”, eds. H. Sigursteinsson, S. Erlingsson, B. Bessason, Icelandic Geotechnical Society, 2019.
- [9] Florkiewicz A., Flieger-Szymańska M., Wanatowski D., Machowiak K., Physico-mechanical characteristics and yielding condition of varved clays, „Geotechnics for Catastrophic flooding Events”, London 2015, pp. 267-273.
- [10] Florkiewicz A., Flieger-Szymańska M., Machowiak K., Wanatowski D., Engineering properties of varved clays from the Junikowski Stream Valley in Poland, „Geotechnics for Catastrophic Fooding Events” 2015, pp. 267-273.
- [11] Florkiewicz A., Flieger-Szymańska M., Wanatowski D., Machowiak K., Yuan R., Yield criteria for glaciotectionally deformed deposits, „Engineering Geology” 2018, 239, pp. 136-143.
- [12] Jastrzębski M., Machowiak K., Krzemińska E., Farmer G.L., Larionov A.N., Murtezi M., Majka J., Sergeev S., Ripley E.M., Whitehouse M., Geochronology, petrogenesis and geodynamic significance of the Visean igneous rocks in the Central Sudetes, northeastern Bohemian Massif, „Lithos” 2018, vol. 316-317, pp. 385-405.
- [13] Just M., Analiza wpływu głębokiego wykopu na istniejące zabudowania – analiza numeryczna MES, „Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej” 2018, nr 27, s. 85-104.
- [14] Kąkol J., Kubiś W., Kubzdela A., On non-archimedean Gurarii spaces, „J. Math. Anal. Appl.” 2017, [450, no. 2](#), pp. 969-981.
- [15] Krawczyk D., Flieger-Szymańska M., The value of plasticity index ( $I_p$ ) and liquidity index ( $I_L$ ) of north polish ablation boulder clays and varved clays depending of the method of its determination, „Przełąd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska” 2018, t. 27(2), nr 80, s. 167-174.
- [16] Krawczyk D., Flieger-Szymańska M., Machowiak K., Wanatowski D., Determination of liquidity index of glacial tills based on the fall cone single point methods. W: XVII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering – Reykjavik, Iceland, 1-6 September 2019, „Geotechnical Engineering – foundation of the future: conference proceedings”, eds. H. Sigursteinsson, S. Erlingsson, B. Bessason, Icelandic Geotechnical Society, 2019.
- [17] Krawczyk D., Flieger-Szymańska M., Wanatowski D., Liquid limit of selected postglacial soils from west-central Poland, „Geological Quarterly” 2019, vol. 63, no. 4.
- [18] Kubzdela A., Selected topics in non-Archimedean Banach spaces, Nicolaus Copernicus University, Toruń 2018.
- [19] Kubzdela A., The distance preserving mappings and isometrics defined on non-Archimedean Banach spaces (in Advances in ultrametric analysis, Amer. Math. Soc.), „Contemp. Math” 2018, 704, pp. 205-214.
- [20] Machowiak K., Granity subdukcyjnego szwu tektonicznego z plutonu Baga-Gazriin Chuluu w centralnej Mongolii – petrologia i geochemia, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2012.
- [21] Machowiak K., Stawikowski W., The Baga-Gazriin Chuluu A-type granites of Central Mongolia compared with other igneous bodies nearby: a geochemical approach, „Geological Quarterly” 2012, 56/3, pp. 457-474.
- [22] Machowiak K., Stawikowski W., Achramowicz S., Late Triassic  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages of the Baga-Gazriin Chuluu A-granites (Central Mongolia), „Journal of Geosciences” 2021, vol. 57, issue 3, pp. 173-188, DOI: <http://dx.doi.org/10.3190/jgeosci.123>.
- [23] Machowiak K., Przydatność skał pochodzenia wulkanicznego w budownictwie i drogownictwie, „Kruszywa: Produkcja – Transport – Zastosowanie” 2013, nr 1, s. 48-54.
- [24] Machowiak K., Wpływ reaktywności alkalicznej kruszyw na trwałość betonu”, „Kruszywa: Produkcja – Transport – Zastosowanie” 2016, nr 3, s. 30-34.
- [25] Machowiak K., Budowa geologiczna Gór Stołowych w oparciu o dotychczasowe wyniki badań. W: Góry Stołowe: przyroda i ludzie, red. C. Kabała, Kudowa-Zdrój, s. 13-30.
- [26] Machowiak K., Flieger-Szymańska M., Wieloletnia zmarzlina południowej Syberii i Mongolii – formy rzeźby terenu, zjawiska sezonowe i wynikające z nich zagrożenia dla budownictwa, „Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej” 2013, nr 15, s. 71-80.
- [27] Machowiak K., Holtz F., Stawikowski W., Ciążela J., Role of water on fractionation processes and trace element distribution in A-type granites: the example of the Baga-Gazriin Chuluu granites (Central Mongolia), „Neues Jahrbuch für Mineralogie – Abhandlungen” 2013, vol. 190, no. 2, pp. 197-219.
- [28] Machowiak K., Madaj A., Nowak M., Jankowiak I., Zróżnicowanie mineralogiczne, strukturalne i teksturalne

- kruszywa granitoidowego i bazaltoidowego pochodzącego z krajowych złóż, „Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej” 2015, nr 19, s. 123-135.
- [29] Machowiak K., Niemczyk W., Skały okruchowe systemu kredowego z terenu Parku Narodowego Gór Stołowych – petrografia i minerały ciężkie. W: Przyrodnicze i geotechniczne aspekty budownictwa, red. A. Duda, M. Flieger-Szymańska, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2020, s. 223-240.
- [30] Michalowski R.L., Wojtasik A., Duda A., Florkiewicz A., Park D., Failure and Remedy of Column-Supported Embankment: Case Study, „Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering” 2018, vol. 144, issue 3, pp. 05017008-1-05017008-14.
- [31] Michalowski R.L., Wojtasik A., Duda A., Florkiewicz A., Park D., Column-Supported Embankment: Failure and Remedy. ASCE Geo-Congress 2019, „Geotechnical Special Publication” 2019, March (GSP 305), pp. 312-324.
- [32] Nawracała J., Wojtasik A., Just M., Awaria dwóch obiektów inżynierskich obciążonych pęcznieniem zasypki przyczółków. W: Przyrodnicze i geotechniczne aspekty budownictwa, red. A. Duda, M. Flieger-Szymańska, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2020, s. 147-160.
- [33] Pawłowski M., Węgliński S., Płyty sztywne do oceny nośności podłoża i warstw konstrukcji nawierzchni. W: Przyrodnicze i geotechniczne aspekty budownictwa, red. A. Duda, M. Flieger-Szymańska, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2020, s. 183-200.
- [34] Potapowicz J., Szumińska D., Szopińska M., Bialik R., Machowiak K., Chmiel S., Polkowska Ż., Seashore sediment and water chemistry at the Admiralty Bay (King George Island, Maritime Antarctica) – Geochemical analysis and correlations between the concentrations of chemical species, „Marine Pollution Bulletin” 2020, vol. 152.
- [35] Sobkowiak J., Flieger-Szymańska M., Sobkowiak T., Wzmocnienie korpusu nasypu linii kolejowej w trudnych warunkach eksploatacyjnych i w skomplikowanych warunkach geologiczno-inżynierskich. W: Przyrodnicze i geotechniczne aspekty budownictwa, red. A. Duda, M. Flieger-Szymańska, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2020, s. 115-126.
- [36] Spaces J., Kąkol J., Kubzdela A., Perez-Garcia C., On countable Tightness and the Lindelöf Property in Non-Archimedean Banach, „J. Conv. Anal.” 2018, 25, pp. 181-199.
- [37] Szopińska M., Szumińska D., Polkowska Ż., Machowiak K., Lehmann S., Chmiel S., The chemistry of river-lake systems in the context of permafrost occurrence (Mongolia, Valley of the Lakes). Part I. Analysis of ion and trace metal concentrations, „Sedimentary Geology” 2016, vol. 340, pp. 74-83.
- [38] Szumińska D., Czapiewski S., Machowiak K., Morphological diversification of the valley bottom with reference to lithological conditions (Orkhon River, Mongolia). W: Proceedings of the International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering 2017 (ICCMSE-2017), 170006-1-170006-4. International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering 2017 (ICCMSE 2017), 21-25.04.2017, Thessaloniki, Greece. Konferencja międzynarodowa indeksowana w WoS.
- [39] Węgliński S., Determination of load action ranges in static and dynamic tests of subgrades by applying rigid plates, „Roads and Bridges – Drogi i Mosty” 2018, vol. 17, no. 1, pp. 73-88.
- [40] Węgliński S., Nieprawidłowości związane z przygotowaniem drewna do wymazu oraz jego transportem po drogach publicznych. W: Przyrodnicze i geotechniczne aspekty budownictwa, red. A. Duda, M. Flieger-Szymańska, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2020, s. 201-222.
- [41] Wojtasik A.T., Mączyńska J., Zieliński P., Projekt i budowa wysokiego nasypu drogowego na obszarze występowania głębokiego torfowiska – droga ekspresowa S5 Gniezno – Mielno. Seminarium IBDiM i PZWFS, opublikowane w materiałach seminarium, Warszawa 2017.
- [42] Wojtasik A.T., Troć M., Nowak M., Wprowadzenie do odwodnienia obiektów kubaturowych (skrypt dla studentów), Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2020.

