



AGNIESZKA POTERAJ-
OLEKSIK

agnieszka.poteraj@
geobear.com

Szybka technologia napraw oraz podnoszenia parametrów wytrzymałości konstrukcji nawierzchni drogowych przy pomocy iniekcji geopolimerowych

Wystąpienie usterek w konstrukcji drogowej rodzi szereg pytań, zarówno o przyczynę, jak również o możliwości i sposoby naprawy, rodzaj działań, jakie należy podjąć itp. Często pojawiają się wątpliwości, czy korzystać z metod stosowanych dotychczas, czy testować doświadczenia zagraniczne? Istotne są kwestie, czy skuteczność rozwiązań stosowanych w innych krajach okaże się taka sama w Polsce? Czy możliwe jest znalezienie krajowych ekspertów posiadających dostateczną wiedzę? Te i wiele innych pytań powinny skłaniać do systematyzowania doświadczeń oraz zespołowego opracowania specyfikacji technicznych. Inwestorzy oraz zarządcy dróg powinni posiadać skuteczne i sprawdzone, a przy tym efektywne rozwiązania, których zastosowanie będzie istotnie wydłużało użyteczność tech-

niczną nawierzchni drogowych oraz maksymalnie ograniczało skutki i koszty społeczne podejmowanych działań. W odróżnieniu do tradycyjnych metod wzmacniania podłoża gruntowego, metoda iniekcji geopolimerowych jest metodą nieinwazyjną. Brak konieczności rozbiórki elementów konstrukcji znacznie skraca czas naprawy. Jak pokazują doświadczenia krajowe i zagraniczne, iniekcje geopolimerowe stanowią skuteczną, szybką i efektywną metodę wzmacniania podbudów i warstw podłoża gruntowego.

Iniekcje geopolimerowe pozwalają poprawić właściwości gruntów poprzez zwiększenie nośności podłoża, poprawę parametrów gruntów niestabilnych podatnych na zmianę objętości, wypełnianie pustych przestrzeni lub kawern, zmniejszenie współczynnika filtracji, jak również ewentualne podnoszenie osiadających obiektów budowlanych [3].



Fot. 1. Zastosowanie iniekcji geopolimerowych, przykłady: a) poziomo-
wanie; b) wypełnianie kawern; c) wsparcie strukturalne; d) wzmocnie-
nie gruntu; e) stabilizacja

Zastosowanie technologii

Technologia bezinwazyjnego wzmocnienia gruntu oraz podbudów znajduje swoje zastosowanie w czterech podstawowych obszarach budownictwa i inżynierii komunikacyjnej. Są to roboty polegające na: stabilizacji i poziomowaniu płyt nawierzchni betonowych oraz wzmocnieniu i zagęszczeniu gruntu. Metoda iniekcji stosowana jest ponadto do wzmocnienia i podbicia fundamentów przy pomocy słupów geopolimerowych. Wykorzystywana jest w celu wypełnienia pustek i kawern oraz uszczelnienia podłoża i warstw podbudowy przed oddziaływaniem wody.

Iniekcję możemy podzielić na dwie podstawowe kategorie w zależności od miejsca wzmocnienia: iniekcję powierzchniową oraz konsolidację wgłębną [5]. Pierwsza kategoria polega na iniektowaniu materiału pomiędzy warstwy konstrukcji oraz gruntu i ma na celu przywrócenie pełnej styczności fundamentu z podłożem. Konsolidacja wgłębną polega na wzmocnieniu i zwiększeniu nośności gruntu. Jest wykonywana pod warstwami konstrukcji, bezpośrednio w podłożu gruntowym. Przykłady realizacji iniekcji geopolimerowych zaprezentowano na fotografiach 1a–1e.

Dzięki wykorzystaniu technologii iniekcji geopolimerowych można osiągnąć następujący efekt w postaci [5]:

- poprawy nośności gruntu pod fundamentami, podbudową oraz wzmocnienie i poprawa nośności warstw podbudowy,
- profilaktycznego ulepszenia i wzmocnienia gruntów ściśliwych,
- ulepszenia gruntów podatnych na skurcz po pęcznieniu,
- wypełniania pustek i kawern np. między gruntem a fundamentami/ podbudową,
- redukcji przewodnictwa wodnego,
- możliwości podniesienia osiadłych budowli,
- wzmocnienia konstrukcji poprzez ujednorodnienie podłoża i usztywnienie podbudowy,
- poprawy nośności gruntów w celu umożliwienia zwiększenia obciążeń,
- przeciwdziałania osiadaniu konstrukcji w długim okresie czasu.

Efekt wzmocnienia po zabiegu iniekcji wywołany jest specyficzną pracą materiału geopolimerowego oraz jego oddziaływania na otaczające środowisko. Wpływ na otaczający grunt charakteryzuje się wzrostem dwóch parametrów stanu odniesienia każdego środowiska – tzn. gęstości i stanu ograniczenia zamknięcia [10], co w konsekwencji przynosi poprawę cech sztywności i wytrzymałości znacznej objętości podłoża znajdującego się pod fundamentami (lub płytami). W celu poprawy właściwości mechanicznych fundamentów, podbudów, podłoża, technologia iniekcji geopolimerowych stanowi nieinwazyjny sposób konsolidacji, nadający się zarówno do gruntów ziarnistych, jak i spójnych, ale również ma zastosowanie do wszystkich rodzajów powierzchni komunikacyjnych i powierzchniowych lub głębokich czy półgłębokich fundamentów (pojedynczych fundamentów, ław fundamentowych, masywów półgłębokich).

Charakterystyka materiału geopolimerowego

Geopolimery to termin obejmujący nieorganiczne, amorficzne, syntetyczne polimery, czyli glinokrzemiany o specyficznym składzie i właściwościach. Stanowią one łańcuchy lub sieci cząsteczek mineralnych połączonych wiązaniami kowalencyjnymi [1, 2]. Najważniejszymi własnościami fizycznymi tych materiałów są wysoka twardość, a ponadto ogniotrwałość.

Ekspansywna żywica poliuretanowa należy do grupy sztywnych polimerów z zamkniętymi komórkami i tym samym jest klasyfikowana w kategorii usieciowionych polimerów termoutwardzalnych. Powstaje w wyniku egzotermicznej reakcji polimeryzacji pomiędzy dwoma składnikami mieszanymi w określonych proporcjach objętościowych.

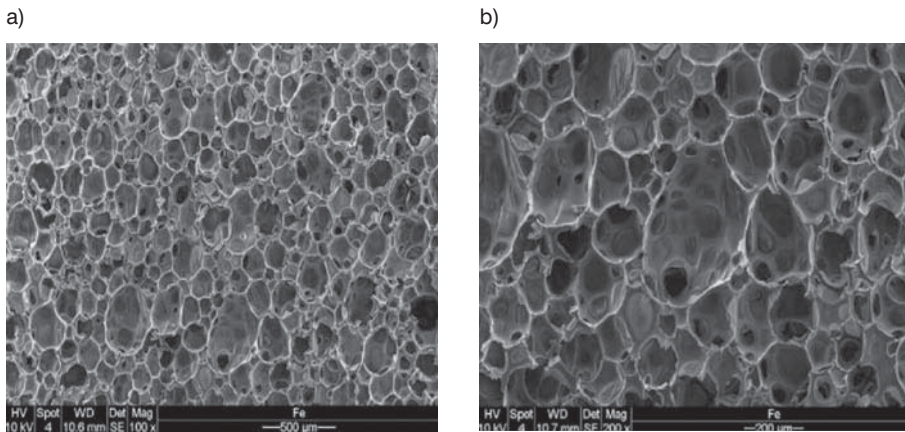
Dwa składniki żywicy Geobear to [10]:

- Geoplus A,
- Geoplus B.

Powyższe składniki są przechowywane w pojemnikach znajdujących się na ciężarówce warsztatowej. Mieszanie i temperatura są sterowane z ciężarówki układem pompowania i ogrzewania wykalibrowanym zgodnie z zaleceniami



Fot. 2. Stabilizacja i podniesienie płyty betonowej nawierzchniowej przed i po wykonaniu iniekcji, droga krajowa nr 50 – Obwodnica Młodzieszyzna



Fot. 3. Widok materiału geopolimerowego pod mikroskopem w dwóch powiększeniach: a) 500 μm , b) 200 μm



Fot. 4. Swobodne rozprężanie materiału geopolimerowego – kolejne etapy

dostawcy. W przypadku reakcji swobodnego rozprężania objętość żywicy może osiągnąć 30-krotność początkowej objętości mieszaniny. Gęstość mieszaniny w stanie ciekłym wynosi 1070 kg/m^3 i jest zbliżona do gęstości wody (1000 kg/m^3). W przeciwieństwie do tego, ekspandowana żywica charakteryzuje się znacznie niższą gęstością, która zależy od ciśnienia pęcznienia. Po wstrzyknięciu do gruntu, żywica tworzy sztywny poliuretan termoutwardzalny, stabilny, niebiodegradowalny i niezanieczyszczający środowiska, którego ciężar jednostkowy może wynosić od $0,7 \text{ kN/m}^3$ do ponad $3,5 \text{ kN/m}^3$ (według stanu ujęcia) w przypadku powszechnych zastosowań. Gęstość żywicy może również osiągnąć $5,0$ do $6,0 \text{ kN/m}^3$ w szczególnych warunkach środowiskowych i strukturalnych [10].

Żywice Geobear zostały poddane testom: degradacji chemicznej, degradacji biologicznej, badaniom mechanicznym z zanurzeniem w wodzie oraz cyklicznym dynamicznym testom trójosiowym [10]. Wyniki testów wykazują dobre właściwości żywicy w stosunku do grzybów i bakterii, tzn. brak zmiany biologicznej bez pogorszenia właściwości mechanicznych, wysoką odporność żywicy na działanie czynników chemicznych oprócz stężonych kwasów, brak wpływu wody na zachowanie i charakterystykę żywicy, jak również brak wpływu obciążenia cyklicznego na właściwości mechaniczne żywicy.

Parametry żywicy geopolimerowych

Materiały geopolimerowe stanowią wysoko ekspansywne żywice o dobrych właściwościach rozszerzających oraz o wysokim przyroście wytrzymałości w stosunkowo krótkim

czasie. Skład żywic dobierany jest zgodnie z warunkami miejsca aplikacji przy uwzględnieniu szeregu czynników takich jak: właściwości gruntu, rodzaj i nośność gruntu, obciążenie, szybkość procesu wiązania oraz zakładane parametry konsolidacji. Jednym z podstawowych parametrów charakteryzujących materiał geopolimerowy jest szybkość wiązania aplikowanej substancji, czyli procesu uzyskania wytrzymałości kohezynnej, a przez to fizycznych i chemicznych właściwości materiału w wyniku reakcji chemicznej (polimeryzacji). Szybkość wiązania przejawia się uzyskaniem około 90–95% zakładanej wytrzymałości w czasie od 30 do 60 sekund, zgodnie z deklaracją producentów [7].



Fot. 5. Geopolimer



Fot. 6. Belki geopolimerowe

Charakterystyczną cechą materiałów geopolimerowych jest możliwość ich zastosowania w bardzo szerokim spektrum temperaturowym. Prace polegające na wzmocnieniu podłoża lub podbudowy konstrukcji drogowej można swobodnie wykonywać w przedziale temperaturowym od ok. -15°C do ok. 60°C , co w przypadku Polski umożliwia prowadzenie prac praktycznie przez cały rok. Poza szybkim

przyrostem wytrzymałości żywice geopolimerowe charakteryzują się również wysokim współczynnikiem pęcznienia, który zawiera się w przedziale 5–30 w zależności od zastosowania określonego rodzaju polimeru [7]. Bardzo ważną cechą z punktu widzenia oddziaływania substancji jednakowo na całym obszarze wzmocnienia jest zjawisko pęcznienia zarówno w pionie, jak i w poziomie. Elastyczność materiału pozwala na łatwe dopasowanie i szczelne wypełnienie wzmocnianego podłoża. Wielokierunkowa ekspansyjność geopolimeru ma również tę zaletę, że powoduje zwiększenie naprężeń poziomych w gruncie lub podbudowie, dzięki czemu uzyskujemy zwiększony parametr nośności [7]. W tabeli 1 przedstawione zostały podstawowe właściwości wytrzymałościowe materiału geopolimerowego, przy czym należy podkreślić bardzo istotną zależność, jaka występuje pomiędzy wytrzymałością na ściskanie, a siłą ekspansji materiału.

Tabela 1. Podstawowe parametry wytrzymałościowe geopolimerów

Parametry geopolimerów	Wartość (uśredniona)
Gęstość objętościowa po ekspansji	50–500 kg/m ³
Wytrzymałość na ściskanie	0,5–15 MPa (do 50 MPa)
Wytrzymałość na rozciąganie	0,5–8 MPa
Wytrzymałość na zginanie	0,5–15 MPa
Ciśnienie pęcznienia	10 kPa
E – współczynnik sprężystości	10–80 MPa

W przypadku procesu iniekcji siła ekspansji jest zawsze mniejsza od wytrzymałości na ściskanie, co oznacza stałe podparcie konstrukcji na etapie procesu wykonywania wzmocnienia. Wytrzymałość materiału geopolimerowego na ściskanie jest zależna od gęstości mieszanki, dlatego też bardzo ważne są dobór odpowiedniej gęstości i składu mieszanki oraz każdorazowo wykonanie pomiarów wytrzymałości. Istotną cechą materiałów geopolimerowych są dobre właściwości hydroizolacyjne, co potwierdzają badania przewodności hydraulicznej przeprowadzane na czystych próbkach żywic geopolimerowych, jak również na próbkach gruntu po wykonanym zabiegu iniekcji. Otrzymane

w wyniku badań na materiałach geopolimerowych w stanie czystym wartości przewodności hydraulicznej zawierają się w zakresie od 1×10^{-9} do 1×10^{-8} m/s, co sugeruje istnienie zmniejszonej porowatości otwartej. Przepuszczalność hydrauliczna próbki gruntu po iniekcji wyniosła w przybliżeniu 10^{-10} m/s, co odpowiada wodoprzepuszczalności iltów, względnie zwartych glin ilastych.

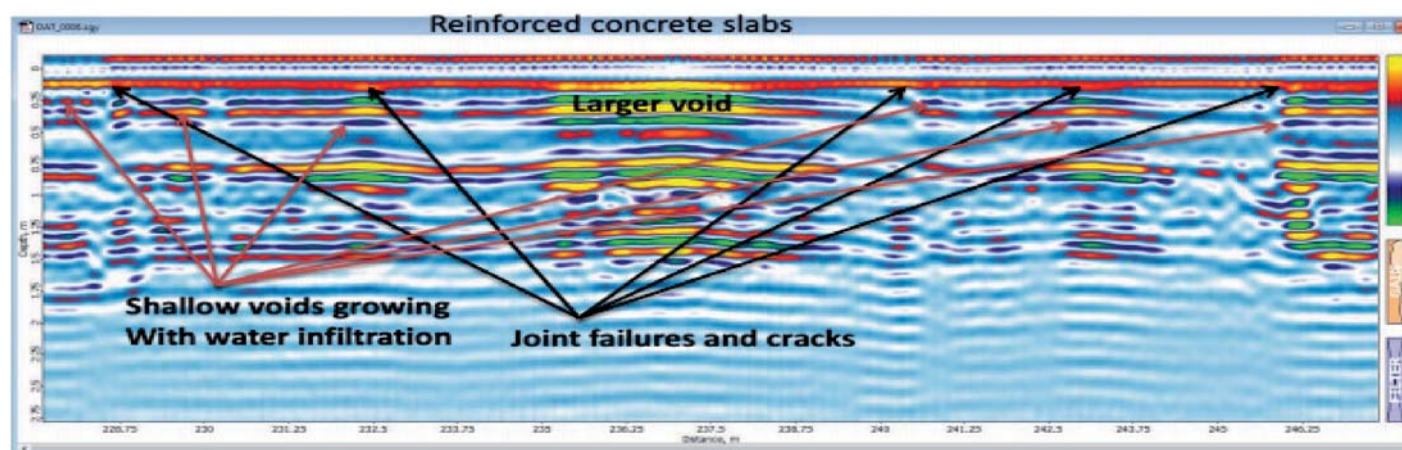
Diagnoza stanu konstrukcji, wymiarowanie, roboty terenowe

Proces wykonania zabiegu iniekcji co do ogólnej zasady nie jest skomplikowany. Poprzez proces iniekcji rozumiany jest szereg działań, badań i pomiarów wykonywanych przed aplikacją i po aplikacji materiału geopolimerowego. Poniżej przedstawiono kolejność czynności, jakie należy wykonać w pełnym i kompleksowym podejściu do wykonania zabiegu:

1. Pomiary wstępne – ocena konstrukcji, badanie nośności, ocena zakresu wzmocnienia;
2. Wymiarowanie iniekcji, dobór ilościowy i jakościowy geopolimeru, obliczenia dotyczące głębokości iniekcji oraz zakładanej wytrzymałości, wykonanie projektu iniekcji;
3. Proces aplikacji materiału geopolimerowego przy stałej kontroli poziomu wzmocnienia oraz stabilności konstrukcji;
4. Uszczelnienie otworów iniekcyjnych w nawierzchni;
5. Badania i pomiary kontrolne porealizacyjne.

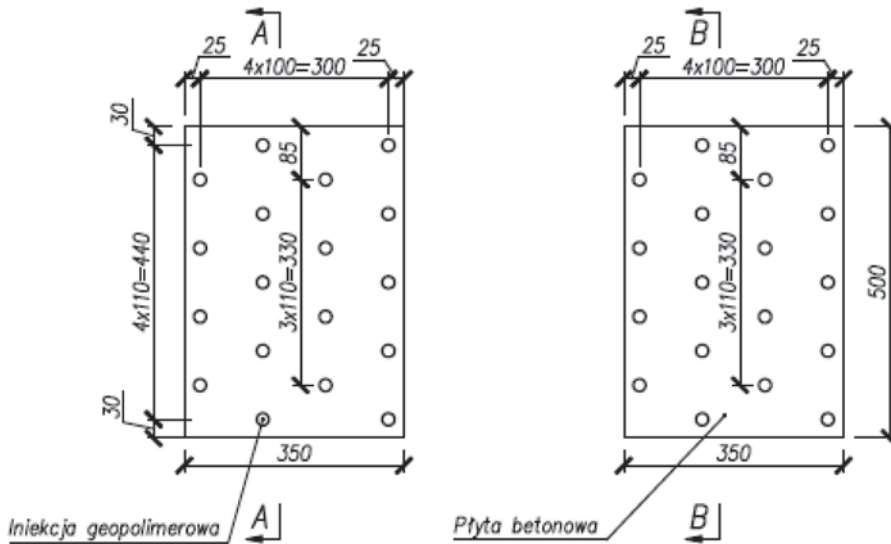
Pierwszym zadaniem, jakie należy wykonać, jest przeprowadzenie badań nośności konstrukcji oraz podłoża. W tym celu najczęściej wykonuje się badanie sondą stożkową dynamiczną (penetrometrem), która służy do określenia parametru nośności oraz określenia charakterystyki gruntu.

W przypadku nawierzchni drogowych użyteczną metodą diagnostyczną jest wykonanie sondowania georadarem GPR. Metoda georadarowa, przy odpowiednich umiejętnościach interpretacji wyników, pozwala na określenie lokalizacji i wielkości (grubości) charakterystycznych warstw oraz anomalii w zakresie ciągłości tych warstw. Zastosowanie radiofali pozwala na wykrycie pustych przestrzeni w podbu-



Rys. 1. Badanie georadarowe wraz z oznaczeniem miejsc występowania anomalii

RZUT ROZMIESZCZENIA PUNKTÓW INIEKCYJNYCH



Rys. 2. Projekt rozmieszczenia punktów iniekcyjnych

dowie, kawern oraz nieciągłości. Identyfikacja uszkodzeń konstrukcji w postaci braku podparcia płyt betonowych, zapadnięć oraz pionowych i poziomych przemieszczeń umożliwia określenie zakresu i sposobu koniecznej naprawy. Wykonanie badań diagnostycznych w uzasadnionych przypadkach powinno zostać poprzedzone weryfikacją nośności, czyli pomiarami HWD, względnie FWD, w celu oceny nośności konstrukcji nawierzchni oraz wskazania miejsc osłabionych. W przypadku oceny nośności podłoża gruntowego najczęściej wykonywanym badaniem jest ocena wskaźnika nośności CBR.

Wymiarowanie procesu iniekcji musi być przeprowadzone przez projektanta geotechnicznego z uwzględnieniem rozstawu i średnicy otworów iniekcyjnych, właściwości gruntu (badania gruntu) i zdefiniowanego obciążenia (diagnoza budowli) w celu oszacowania wymaganej ilości żywicy i określenia szybkości poprawy parametrów nośności gruntu lub podbudowy [10].

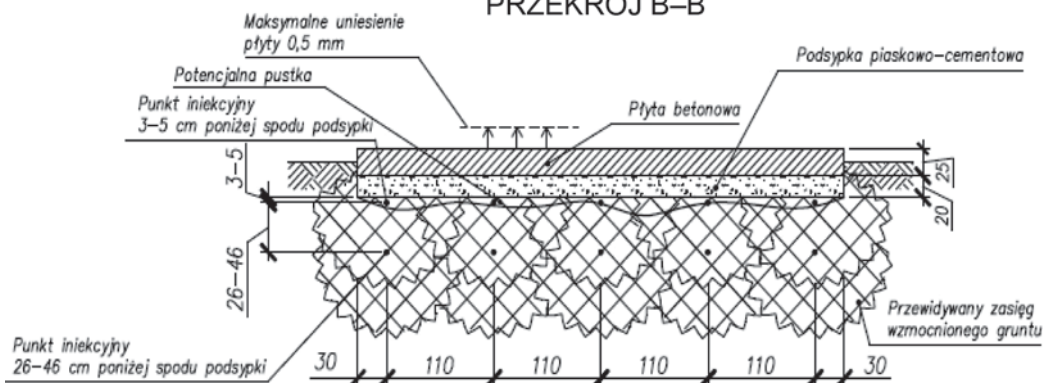
Znając skalę, zakres wzmocnienia oraz charakterystykę gruntu lub materiału podbudowy, wykonuje się specjalne obliczenia mające na celu ustalenie ilości materiału geopo-

limerowego, jaka będzie niezbędna do aplikacji. Określone zostają skład ilościowy oraz poziom wzmocnienia (poprawa nośności). Na rysunku 2 przedstawiono projekt otworów iniekcyjnych na obszarze wzmocnienia. Rysunek przedstawia schemat rozłożenia punktów iniekcyjnych, czyli otworów o średnicy 12 mm, przez które żywica iniektowana będzie do wnętrza konstrukcji. Punkty iniekcyjne rozłożone są regularnie, najczęściej w odległości 1,0–1,5 m od siebie. Odległość pomiędzy otworami warunkowana jest strefą oddziaływania pojedynczego punktu iniekcyjnego, która wynosi ok. 1 m, przy czym schemat ułożenia punktów może być uzależniony od rodzaju gruntu, obciążenia i nośności.

Materiał geopolimerowy może być aplikowany metodą wielorurową lub metodą ekstrakcyjną, tzn. poprzez wywiercenie pojedynczego otworu o średnicy 15–50

mm do głębokości wzmocnienia. Proces wtłaczania materiału geopolimerowego jest objęty stałą kontrolą stopnia polimeryzacji oraz wypełnienia wzmocnianego obszaru. Kontrolowany jest stopień zagęszczenia materiału, jak również stopień osiągniętego wzmocnienia. Ciągły monitoring istotnych elementów wzmocnianej konstrukcji odbywa się za pomocą specjalistycznych laserów i sensorów. Po zakończeniu procesu aplikacji żywicy w głąb konstrukcji zabezpieczane są otwory iniekcyjne. Zakończeniem procesu pełnego wykonania zabiegu iniekcji geopolimerowej jest wykonanie badań kontrolnych porealizacyjnych. W tym celu najbardziej powszechne i najczęściej wykonywane jest badanie sondą dynamiczną stożkową. Rodzaj i zakres badań porealizacyjnych są w dużej mierze tożsame z badaniami diagnostycznymi wykonywanymi przed realizacją robót. W przypadku nawierzchni drogowych istotnymi badaniami porealizacyjnymi są również pomiary ugięć oraz ocena nośności konstrukcji nawierzchni. W celu określenia nieciągłości warstw oraz miejsc występowania pustek i braku podparcia podbudowy najlepszym rozwiązaniem jest zastosowanie metod radiofalowych.

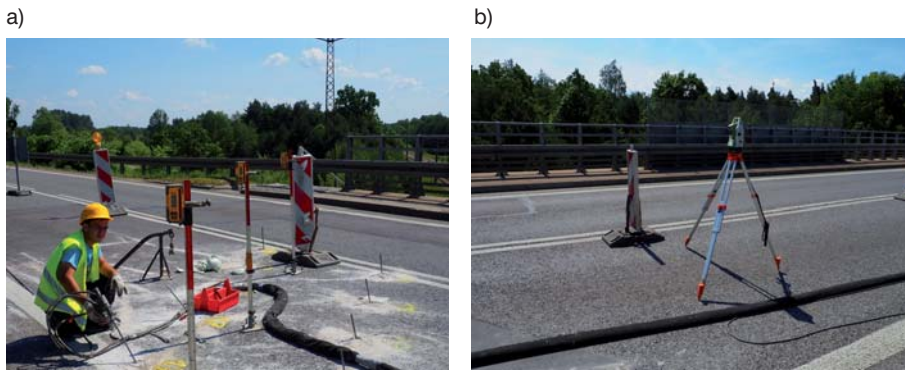
PRZEKRÓJ B-B



Rys. 3. Oznaczenie strefy oddziaływania iniekcji, przekrój przez konstrukcję nawierzchni

Badania kontrole

W trakcie wszystkich prac iniekcyjnych wzmocniana warstwa w obrębie każdego otworu iniekcyjnego jest monitorowana za pomocą laserowego sprzętu niwelacyjnego z czujnikami umieszczonymi w określonych miejscach. Często wymagane jest również umieszczenie czujników bezpośrednio na konstrukcji, aby monitorować jej przemieszczenia.



Fot. 7. Monitoring laserowy: a) czujniki laserowe, b) laser krzyżowy

Podczas prac stabilizacyjnych każdy punkt iniekcyjny poddany jest zabiegowi do momentu, aż pożądaný ruch zostanie zarejestrowany na najbliższym czujniku. W projektach stabilizacyjnych jest to $<0,5$ mm. Tam, gdzie wymagane jest podnoszenie (zakładając, że struktura, poniżej której obszar jest poddawany obróbce, może być podniesiona bez przeszkód), ilość ruchu będzie rejestrowana w przyrostach w zależności od specyficznych wymagań projektu.

Zarejestrowany ruch „na konstrukcji” wskazuje moment, kiedy osiągnięty zostanie stopień zagęszczenia wzmocnianych warstw. Pokaże to również, że poddana obróbce warstwa została wystarczająco zainiektowana, ponieważ siła skierowana do góry będzie oddziaływać na spód fundamentu, powodując ruch w górę. Zarejestrowane przemieszczenie jest informacją, że utworzono wystarczająco ulepszoną warstwę. Pozwala to również na weryfikację prac, ponieważ monitorowanie poziomu lasera będzie wskazywać wysokość podnoszenia uzyskaną przy każdym wstrzyknięciu iniektu.

Urządzenie monitorujące składa się z nadajnika i kilku odbiorników zintegrowanych z budowlą. Odbiornik wykrywa zmiany wysokości względem stałej płaszczyzny, opisanej przez wiązkę laserową nadajnika. Nadajnik znajduje się z dala od miejsca wstrzyknięcia, w punkcie neutralnym, niepodlegającym wpływowi wstrzyknięcia. Cały ruch budowli jest mierzony w czasie rzeczywistym. Wszystkie te pomiary są rejestrowane w raporcie z budowy.

Rozszerzenie żywicy przenosi w pierwszej kolejności ciśnienie do stref o najmniejszej wytrzymałości, w wyniku czego występuje zagęszczenie gruntu w płaszczyźnie poziomej. W sytuacji, gdy otrzymuje się równowagę między głównymi naprężeniami poziomymi i pionowymi, rozszerzenie żywicy kontynuuje wywieranie nacisku pionowego, przeciwnego naciskowi indukowanemu przez nadmierne obciążenie i ciężar przylegającego gruntu.

Poprawa parametrów nośności

Badania [12] wykazały wyraźną poprawę nośności gruntu (naprężeń i odkształceń), który był poddany ulepszeniu za pomocą jednofazowej iniekcji żywicy ekspansyjnej Geobear. Poniższa tabela pokazuje ulepszenia (pod względem naprężeń i odkształceń) uzyskane podczas tego eksperymentu.

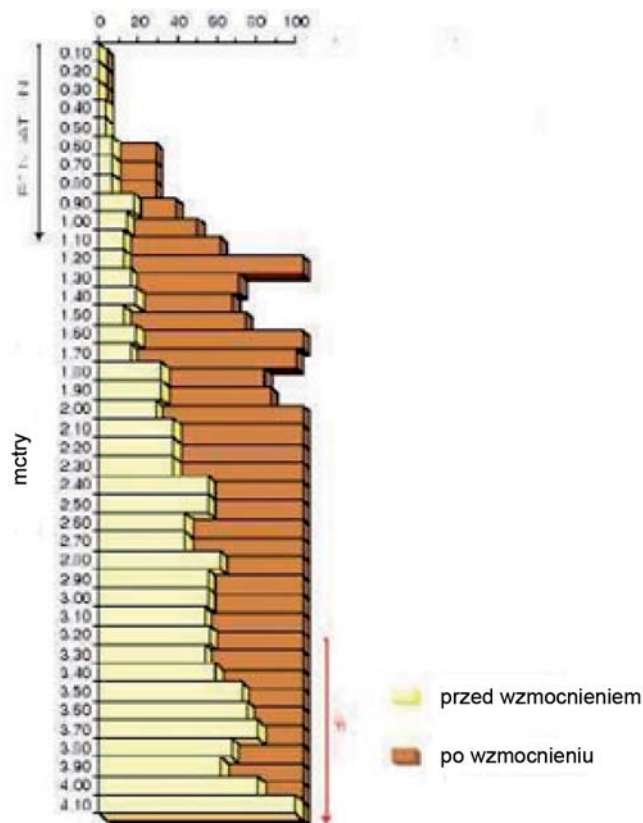
Równolegle pozyskiwanych jest szereg informacji z doświadczeń na inwestycjach realizowanych przez Geobear, pozwalających ocenić stopień poprawy nośności ulepszanego gruntu. Analiza obejmuje wyniki z testów „in situ” (penetrometrycznych i ciśnieniowych) wykonywanych przed i po iniekcjach.

Wskaźnik poprawy gruntu równy jest końcowym właściwościom mechanicznym oraz początkowym właściwościom mechanicznym tzn. z testów kontrolnych przeprowadzonych przed i po iniekcjach. Wyniki są wartościami średnimi reprezentatywnymi dla zakresu

uzyskanych danych. W zależności od konfiguracji przeprowadzanego ulepszenia (stan początkowych naprężeń gleby w miejscu wstrzyknięcia, rodzaj gleby, która ma być poddana zabiegowi lub przyczyny wymagające ulepszenia), zostanie określony cel ulepszenia (stopień, wskaźnik) podczas wstępnego wymiarowania.

Tabela 2. Stopień ulepszenia po iniekcji

	Naprężenie	Odształcenie
Stopień ulepszenia po iniekcji	od 200 do 300%	od 800 do 1000%



Rys. 4. Przykład testu pokazującego największe wytrzymałości przed i po iniekcji – badanie sondą dynamiczną

Teoretyczny stopień poprawy wynosi zwykle od 120 do 200% w przypadku pojedynczej fazy iniekcji. Należy to po-

Tabela 3. Zestawianie przykładowych wysokości nakładów oraz czasu wykonania danej technologii

Rozwiązanie	Geopolimery geobear	Podlewka cementowa	Świder	Podbudowa
Produkt	Lekki rozszerzający się geopolimer	Mieszanka zaprawy cementowej	Pale wkręcane	Beton ciężki
Specyfika prac	Minimalna uciążliwość – brak wykopów, praca w różnych warunkach gruntowych, możliwość zastosowania w ciasnych przestrzeniach	Wymaga ciężkiego sprzętu, instalacja powoduje duże utrudnienia	Wymaga ciężkiego sprzętu	Wymaga wykopu pod całym obiektem
Szacunkowy czas wykonania prac	100 min	160 min	180 min	260 min
Szacunkowy koszt	100 zł	180 zł	160 zł	200 zł

twierdzić na etapie budowy za pomocą porównawczych testów kontrolnych przeprowadzonych przed i po wstrzyknięciach. Nowy uzyskany wówczas wskaźnik musi być co najmniej równy lub większy niż teoretyczna szybkość określona podczas wstępnego wymiarowania. W przeciwnym przypadku należy przeprowadzić nową fazę wstrzykiwania, aż do uzyskania pożądanej poprawy. Można rozważyć cel większy niż 200%, ale będzie to wymagać dostosowania sposobu iniektowania (wymiarowanie punktów iniekcyjnych, fazowanie, ilość). Niezależnie od pożądanego celu poprawy, musi on pozostać kompatybilny ze strukturą (obciążenie, bezwładność, sztywność).

Podsumowanie

W budownictwie drogowym istotnymi czynnikami stają się czas oraz minimalizacja uciążliwości robót. Proces naprawczy polegający na szybkiej i małoinwazyjnej iniekcji w głąb gruntu pozwala na wzmocnienie bezpośrednio pod obiektem bez wykopów, drgań czy wprowadzania ciężkiego sprzętu budowlanego. Stosowane geopolimery to wysoko ekspansywne żywice, szybko penetrujące grunt i osiągające swoje właściwości użytkowe w bardzo krótkim czasie. Dzięki temu stanowią szybką i nieuciążliwą alternatywę do tradycyjnych technologii stosowanych w celu rozwiązania problemów osiadania płyt nawierzchniowych, wypełniania kawern i pustek, poziomowania oraz wzmocnienia konstrukcji nawierzchni [9].

W przypadku konstrukcji nawierzchni drogowych iniekcja może być stosowana w celu osiągnięcia dwóch celów:

- wzmocnienia konstrukcji,
- poprawy równości.

Z punktu widzenia ewentualnych uszkodzeń i względnie występujących wad konstrukcji nawierzchni betonowych metoda iniekcji daje dobre efekty w następujących przypadkach [9]:

- poprawy nośności i wzmocnienie podbudowy – wypełnienie, zagęszczenie i konsolidacja,
- podparcia konstrukcji – usunięcie wody z porów i pustych przestrzeni, wypełnienie pustek i kawern,
- poprawy nośności podłoża gruntowego – konsolidacja i zbrylenie gruntu, ujednorodnienie podłoża.

Różnice technologii pomiędzy iniekcją geopolimerą w odniesieniu do iniekcji cementowych lub iniekcji o mieszanym składzie:

- rozszerzalność i ekspansywność – użycie żywicy o silnym rozszerzaniu (ponad 5-krotność początkowej objętości przy swobodnym rozszerzaniu) i szybkim (początek rozszerzania od 2 do 5 sekund),
- wysokie ciśnienie pęcznienia żywicy Geobear podczas procesu ekspansji w gruncie,
- wdrożenie przy użyciu bardzo lekkiego i bardzo zredukowanego sprzętu umożliwiającego niemal zupełnie nieniszczące wykonanie,
- wtryskiwanie żywicy na głębokość (do około –8,0 m w stosunku do platformy roboczej),
- kontrola ekspansji za pomocą monitoringu ruchu przez poziom lasera,
- unikalny sposób dyfuzji żywicy, który odbywa się poprzez impregnację (makropróżnie i pęknięcia) lub poprzez pękanie/przebiecia lub przez kombinację tych dwóch rodzajów dyfuzji poprzez systematyczne działanie trójwymiarowego statycznego kompaktowania (zagęszczania),
- technologia umożliwia podniesienie konstrukcji do 30 cm, korygowanie nachyleń i eliminowanie różnic w wysokości,
- wzmocnienie podłoża gruntowego, możliwość zwiększenia dopuszczalnego nacisku powierzchniowego do 600%,
- system aplikacji geopolimerów umożliwia pełną i precyzyjną kontrolę zabiegu poprzez ciągły monitoring obszaru osiadania, który ma zostać podniesiony (eliminuje to w znaczny sposób ryzyko połamania lub pęknięcia płyt).

Bibliografia

- [1] www.geopolymer.org.
- [2] www.sciencedirect.com.
- [3] Non-Disruptive Ground Engineering Services. How ground injection works and where to use it. Prezentacja URETEK, grudzień 2017.
- [4] Koch R.: Zasada 80/20. Białystok 1997.
- [5] Bromley L., Hadfield D.: Broszura techniczna: Iniekcje geopolimerowe w budownictwie. Uretek. 2016.
- [6] www.geobear.pl.
- [7] Poteraj-Oleksiak A.: Wzmocnianie podłoża gruntowego i podbudowy dróg betonowych przy pomocy iniekcji geopolimerowych. II Suwalskie Forum Drogowe, Suwałki, 16.03.2018 r.
- [8] www.inzynieria.com
- [9] www.geobear.pl.
- [10] CSTB Europejska Ocena Techniczna
- [11] TPA: Analiza stanu nawierzchni betonowej DK50 na odcinku obwodnicy Młodzieszyna w województwie mazowieckim. 2017.
- [12] Badanie Hellmeier P. Soranzo E. Wu R. Niederbrucker, Paschetto A. (2011) "An experimental investigation into the performance of polyurethane grouting in soil"