



Marta ZDANOWICZ-DEJNAK\*

### ***Problematyka wzmocnienia podłoża autostrady A4 Jarosław–Radymno na obszarach występowania słabonośnych gruntów organicznych***

Streszczenie: W ramach przygotowań Polski do EURO 2012 rozpoczęto budowę autostrady A4, w tym omawiany odcinek Jarosław–Radymno w woj. podkarpackim. Dużym wyzwaniem podczas budowy tego odcinka było uzyskanie odpowiednich parametrów nośności podłoża na terenach występowania słabonośnych gruntów organicznych. Zastosowano metody wzmocnienia podłoża, takie jak wymiany dynamiczne, gdzie kolumny tworzone z kruszywa zagęszcza się odważnikiem spuszczanym swobodnie z dźwigu oraz kolumny CMC, które powstają z mieszanki betonowej włączanej w odwierty wykonane w słabonośnym gruncie.

Metodą wymiany dynamicznej wzmocniono między innymi obszar podłoża słabonośnego, przylegający do miejscowości Mokra. Teren ten był zabagniony i charakteryzował się wysokim poziomem wód gruntowych. Podłoże składające się z gruntów słabonośnych nie posiadało parametrów wystarczających do budowy wysokiego nasypu zaprojektowanego w tym miejscu. Kolumny wymiany dynamicznej pozwoliły na eliminację dużych osiadań i zapewnienie nośności nasypu i nawierzchni. Wzmocnienie gruntu rozpoczęło się na przygotowanej wcześniej platformie roboczej, ponieważ stan gruntu znajdującego się na poziomie terenu nie pozwalał na ruch ciężkiego sprzętu. Po wykonaniu wszystkich kolumn platformę roboczą wyrównano i zagęszczono powierzchniowo.

Metodą kolumn CMC wykonano wzmocnienie m.in. na odcinku 643+200–643+640 ponieważ na podstawie wykonanych odwiertów geologicznych stwierdzono w podłożu do głębokości 8,1 m występowanie gruntów organicznych. Do wykonania kolumn zastosowano odpowiednio zaprojektowany świder przemieszczeniowy, który rozpychając istniejący grunt tworzył przestrzenie, w których zostały wykonane kolumny betonowe. Obciążenie przekazane na podłoże jest przenoszone nie tylko przez kolumny, ale także przez otaczający je grunt, z którym współpracują.

Zastosowanie tych metod wzmocnienia gruntu pozwoliło ograniczyć tradycyjne wymiany gruntu. Brak konieczności wywozu gruntów nieprzydatnych do zabudowy i dowozu materiału o lepszych właściwościach znacznie skrócił czas realizacji inwestycji.

Słowa kluczowe: wzmocnienie podłoża, kolumny wymiany dynamicznej, kolumny CMC

---

\* Mgr inż., doktorantka, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska;  
e-mail: marta.zdanowicz@gmail.com

## ***The problem of ground strengthening on the A4 motorway from Jarosław to Radymno in areas with weak organic soils***

**Abstract:** Polish preparations for Euro 2012 include construction of the A4 motorway, including the Jarosław–Radymno stretch in the Podkarpackie province as described in this article. The greatest challenge during the construction of this section of road was to achieve the desired parameters of the ground bearing capacity in areas comprised of weak organic soils. In order to strengthen the ground in such areas, the method of dynamic exchange was employed in which columns of crushed stones were packed with a beetle-head dropped by a caterpillar lift, as well as CMC which are made from concrete piled into wells made in weak soils. The weak organic soils area near the town of Mokra was one of the places where the method of dynamic exchange was applied. A high level of underground water was a characteristic of this boggy terrain. The substrate consisting of weak organic soils did not meet the required parameters to build a high embankment which was designed for this location. Dynamic exchange columns eliminated large subsidence and guaranteed the bearing capacity of the embankment and pavement. Reinforcement of the ground began on a previously prepared work platform because the state of the ground located at the ground level did not allow for the movement of heavy equipment. The work platform was leveled and thickened after all columns were completed. The geological wells in the 643.2–643.64 km stretch showed that the substrate consists of organic soils to a depth of 8.1 m, thus necessitating the application of the CMC method in this area. A specially designed displacement drill was used for column construction. The drill created spaces into which concrete columns were placed while pushing the existing ground aside. The load placed on the substrate was borne not only by the columns but also by the surrounding ground which supported the columns. The application of the above methods of ground reinforcement reduced the traditional ground exchanges. The duration of the investment was significantly shortened because it was not necessary to export the ground that was otherwise useless for building and to supply better quality material.

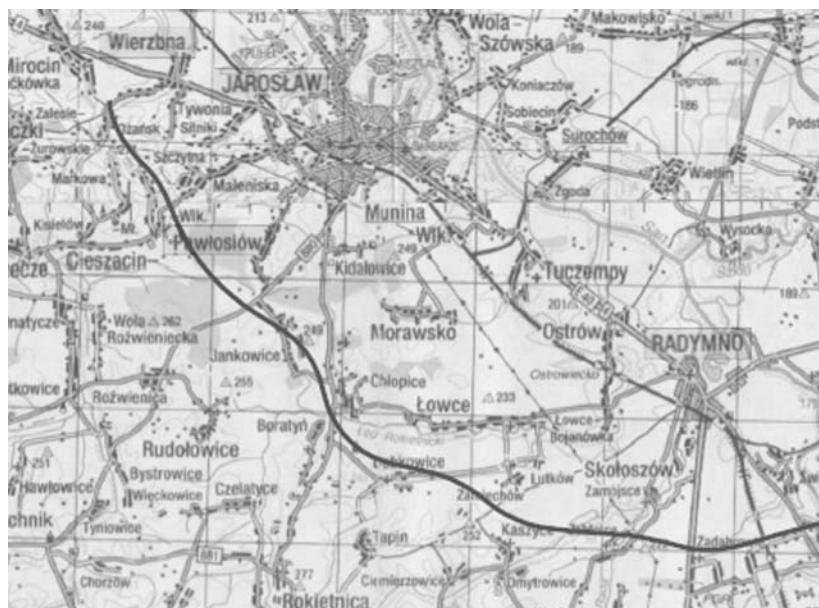
**Key words:** substrate reinforcement, dynamic exchange columns, CMC columns

### ***Wprowadzenie***

W artykule przedstawiono problem wzmocnienia podłoża na autostradzie A4 na przykładzie odcinka Jarosław węzeł Wierzbna (bez węzła) – Radymno (z węzłem) km 621+800,67–647+455,82.

W ramach przygotowań Polski do EURO 2012 zaplanowano dostosowanie infrastruktury drogowej do standardów Unii Europejskiej, między innymi budowę autostrady A4, która połączy przejście graniczne z Niemcami w Zgorzelcu z przejściem granicznym z Ukrainą w Korczowej. Autostrada A4 została podzielona na odcinki, których wykonawcy zostali wyłonieni w oddzielnych przetargach. Omawiany odcinek znajduje się około 30 km od przejścia granicznego w Korczowej i jest realizowany przez firmę BUDIMEX S.A. Projektowana autostrada na omawianym odcinku znajduje się na terenie województwa podkarpackiego; przebiega głównie przez tereny użytkowane rolniczo, w mniejszym stopniu przez tereny leśne oraz w niewielkim procencie przez tereny z zabudową (rys. 1).

Z uwagi na to, że budowana autostrada jest drogą bezkolizyjną, zachodziła konieczność przebudowy wszystkich krzyżujących się z nią ciągów komunikacyjnych. Na przecięciach omawianego odcinka autostrady z istniejącymi drogami przewidziano budowę 23 obiektów inżynierskich nad lub w ciągu autostrady, zapewniających bezkolizyjne przejazdy bez dostępności do niej. Wyjątkiem od tej reguły są dwa węzły komunikacyjne na przecięciach autostrady z drogą wojewódzką nr 880 Jarosław–Pruchnik, węzeł Pawłosiów oraz z drogą krajową nr 77 Lipnik–Przemyśl, węzeł Radymno. Zakres przebudowy dróg mieści się w liniach rozgraniczających budowy autostrady.



Rys. 1. Trasa projektowanego odcinka autostrady A4 (Przedsiębiorstwo Geologiczne sp. z o.o., 2009)

Fig. 1. The route of the designed A4 motorway

Generalnie utrzymano dotychczasowe kierunki dróg pełniących funkcje układu podstawowego sieci drogowej w układzie krajowym, wojewódzkim, powiatowym i gminnym. Do dróg układu podstawowego podłączono sieć dróg zapewniających obsługę rozciętego terenu. W projekcie również uwzględniono usunięcie kolizji przebiegu odcinka autostrady z istniejącymi sieciami gazowymi, elektro-energetycznymi, teletechnicznymi, wodociagowymi, kanalizacyjnymi i melioracyjnymi. W ramach przebudowy istniejących sieci usunięto m.in. 3 kolizje z liniami wysokiego napięcia oraz 6 kolizji z gazociągami wysokiego ciśnienia. Inwestycja również obejmuje budowę czterech miejsc obsługi podróżnych (MOP), jednego obwodu utrzymania autostrady (OUA) oraz dwóch placów pod stacje poboru opłat (SPO) na węźle Pawłosiów i węźle Radymno.

Niweleta omawianego odcinka autostrady została poprowadzona wzdłuż wewnętrznych krawędzi jezdni przy pasie dzielącym i jest ona wspólna dla obu jezdni. Przy projektowaniu niwelety kierowano się zasadą dostosowania jej przebiegu do ukształtowania terenu, przy równoczesnym zachowaniu parametrów geometrycznych określonych dla elementów drogi w planie i w przekroju podłużnym dla autostrad w Polsce. Duży wpływ na ukształtowanie wysokościowe niwelety miały:

- krzyżowanie się autostrady z drogami, którym należało zapewnić właściwą skrajnię pionową,
- przekroczenia rzek i potoków, wymagających zachowania światła mostów,
- zapewnienie właściwego pochylenia podłużnego w obrębie kształtowania rampy drogowej, gdzie następuje zmiana pochylenia poprzecznego jezdni,
- zapewnienie odprowadzenia wód powierzchniowych do projektowanych przepustów i urządzeń odprowadzających wody opadowe z jezdni.

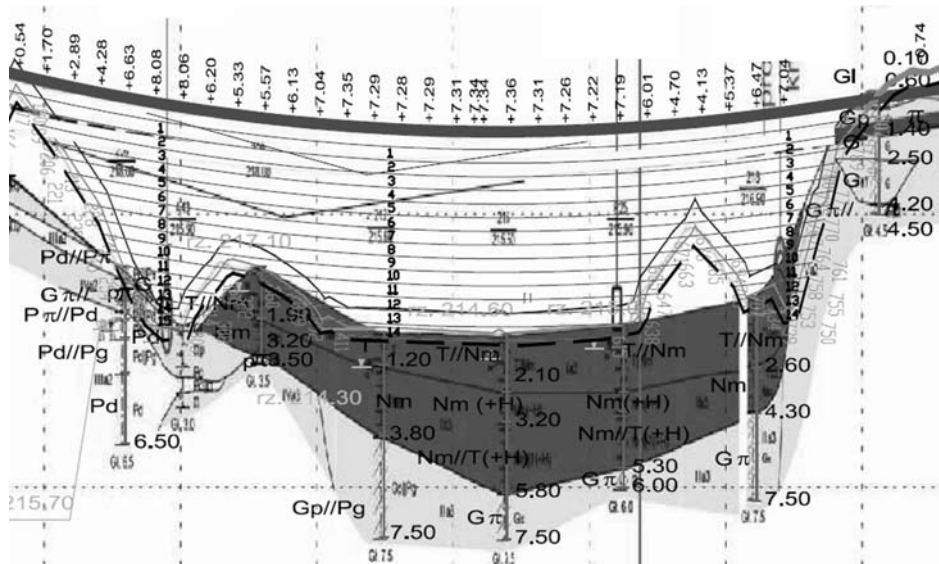
Zapewnienie wysokiego poziomu bezpieczeństwa i wygody ruchu oraz efektu przestrzennego trasy uzyskano, spełniając warunki koordynacji geometrycznej autostrady poprzez wzajemne usytuowanie względem siebie łuków w planie i w przekroju podłużnym.

Teren inwestycji zlokalizowany jest głównie na obszarze Pogórza Rzeszowskiego. Pogórze zbudowane jest z kilku pasm wzniesień. W wielu miejscach wzniesienia tworzą charakterystyczne dla obszarów lessowych głębokie wąwozy (parowy), zwane tu wądołami. Obszar ten razem z przylegającą do niego Doliną Dolnego Sanu obfituje w bardzo dobre gleby dla przemysłu rolniczego, takie jak torfy i czarnoziemy, które jednak nie posiadają parametrów wystarczających do zabudowy pod autostradę, dlatego w wielu miejscach, aby uzyskać wymagane parametry podłoża, należało grunt wymienić lub wzmocnić (Wiłun 2007).

Poniżej przedstawiono zastosowane wzmocnienia podłoża w technologii kolumn wymiany dynamicznej oraz kolumn CMC.

### 1. Wzmocnienie podłoża gruntowego pod nasypami drogowymi w technologii kolumn wymiany dynamicznej

Metodą wymiany dynamicznej wzmocniono m.in. obszar podłoża słabonośnego przylegający do miejscowości Mokra, która leży na trasie drogi nr 880 Jarosław–Pruchnik. Teren ten był zabagniony i charakteryzował się wysokim poziomem wód gruntowych. Podłoże składające się z gruntów słabonośnych nie posiadało parametrów wystarczających do budowy wysokiego nasypu zaprojektowanego w tym miejscu. Wymianę dynamiczną zrealizowano w km 629+320–629+785 trasy głównej. Na rysunku 2 przedstawiono profil



Rys. 2. Profil geologiczny trasy głównej w km 629+320 do km 629+785 (Przedsiębiorstwo Geologiczne sp. z o.o., 2009)

Fig. 2. Main route geological profile from 629+320 km to 629+785

podłużny tego odcinka z naniesioną grubą linią niweletą projektowanej autostrady a ciemnym kolorem grunty słabonośne, które w tym przypadku stanowiły torfy i namuły.

Poniżej przedstawiono podstawowe pojęcia z zakresu wymiany dynamicznej:

**Wzmocnienie podłoża** – trwałe nadanie podłożu gruntowemu właściwości zwiększających jego nośność oraz zmniejszających odkształcalność i wrażliwość na wpływ czynników atmosferycznych.

**Kolumna z kruszywa** – kolumna z kruszywa uformowana bezpośrednio w gruncie rodzimym ubijakami do konsolidacji dynamicznej, zrzuconymi z odpowiedniej wysokości za pomocą specjalnych urządzeń kafarowych.

**Ubijak do wymiany dynamicznej** – blok masywny o podstawie okrągłej lub kwadratowej o minimalnym wymiarze podstawy (wymiar boku lub średnica) powyżej 1,2 m i powierzchni podstawy 1,4 m<sup>2</sup> i masie rzędu 8–20 t (fot. 1).



Fot. 1. Ubijak do wymiany dynamicznej

Phot. 1. Beetle for dynamic exchange

**Urządzenie kafarowe do konsolidacji dynamicznej** – specjalna maszyna z wysokim masztem linowym, umożliwiającą uniesienie ubijaka przy zamkniętym zbloczu, a następnie odczepianie ubijaka w wyniku samoczynnego otwarcia zblocza i jego swobodne spadanie (fot. 2).

Na wyżej wymienionym odcinku przewidziano dynamiczną konsolidację gruntów organicznych oraz miękkoplastycznych i plastycznych gruntów spoistych, zalegających średnio do głębokości 4,7 m poniżej poziomu obecnego terenu w celu podwyższenia i wyrównania modułu podatności podłoża, co warunkuje ograniczenie osiadań całkowitych i zmniejszenie różnic osiadania do wartości dopuszczalnych. Osiadania konstrukcji w trakcie eksploatacji (po wykonaniu wzmocnienia podłoża) oszacowano na poziomie 5 cm na nasypach niskich.



Fot. 2. Urządzenia kafarowe podczas wykonywania konsolidacji dynamicznej

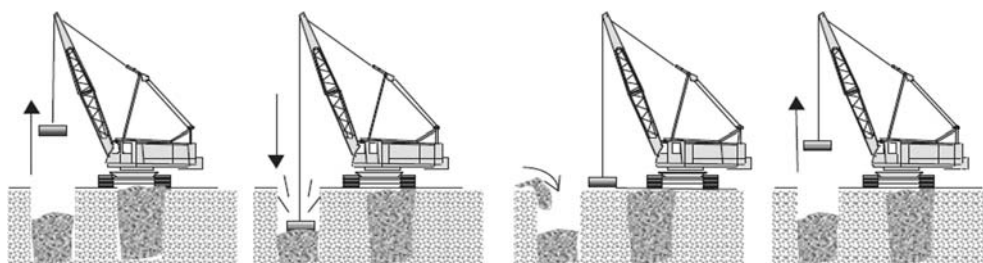
Phot. 2. Ram engine device during dynamic consolidation

Założono, że na skutek prac wzmacniających, podłoże ulegnie ujednoczeniu i lokalne niejednorodności nie spowodują różnic osiadań większych od 1 cm na odcinku 10 m.

Kolumny wymiany dynamicznej pozwalają na eliminację dużych osiadań i zapewnienie nośności nasypu i nawierzchni. Z uwagi na duże średnice kolumn wymiany dynamicznej (1,8–2,2 m) nie istnieje możliwość rozplywu kolumn w słabym gruncie organicznym. Udry o dużej energii powodują wymianę częściową gruntu słabego na kruszywo, natomiast grunt organiczny pozostający pomiędzy kolumnami ulega konsolidacji. Proces równoczesnego zmniejszania się zawartości wody i objętości porów w gruncie po zaistnieniu przyrostu naprężeń nazywa się konsolidacją gruntu (Wiłun 2007).

Wibracje powstałe na skutek zastosowania metody wymiany dynamicznej nie stwarzały na omawianym odcinku żadnego problemu technologicznego ze względu na duże odległości od terenów zabudowanych.

Na rysunku 3 przedstawiono technologię wymiany dynamicznej, polegającą na wykonaniu w spoiстым gruncie wielkośrednicowych słupów z kruszywa. Powstałe słupy formo-



Rys. 3. Schemat formowania kolumn wymiany dynamicznej (Menard Polska Sp. z.o.o., 2010)

Fig. 3. Dynamic exchange column forming scheme

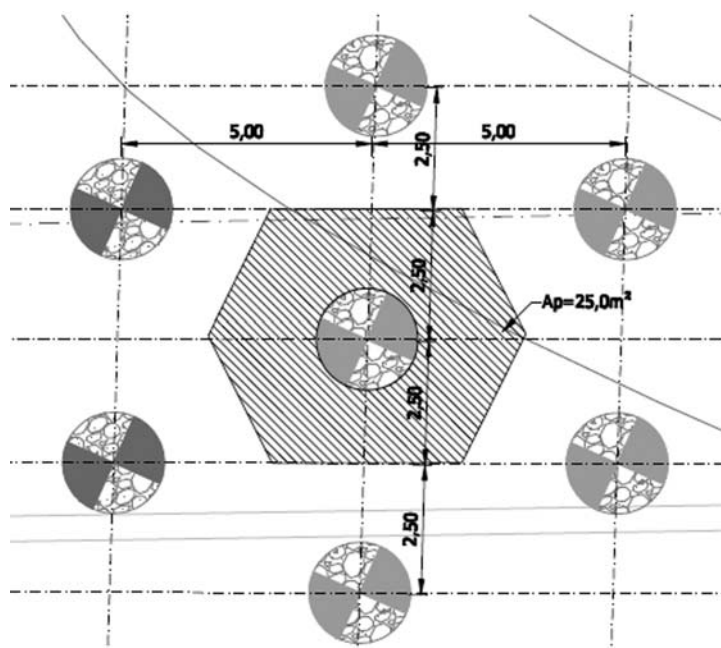
wane są w większości przypadków do stropu warstwy niżej leżącego gruntu nośnego. Kolumny wymiany dynamicznej formowane są poprzez wbijanie kruszywa dużym ciężarem upuszczanym z wysokości od 10 do 30 m w warstwę gruntu o małej nośności. Kształt i przekrój kolumny zależy od energii uderzeń bijaka, jego rozmiarów oraz warunków gruntowo-wodnych w rejonie wzmocnienia.

Kolumny formuje się do momentu zaniknięcia wpędu ubijaka i stabilizacji wymuszonych osiadań, co sygnalizuje osiągnięcie przez dno kolumny warstwy gruntu o odpowiedniej nośności. Dopuszczalne jest pozostawienie w podłożu warstwy silnie skonsolidowanego gruntu organicznego o parametrach geotechnicznych, gwarantujących nie przekroczenie dopuszczalnych osiadań.

### 1.1. Rozwiązanie projektowe

Analiza warunków geotechnicznych oraz analiza obciążeń przekazywanych na podłoże gruntowe pozwoliła na zaprojektowanie wzmocnienia podłoża gruntowego metodą wymiany dynamicznej.

Podstawowy rozstaw kolumn (rys. 4.) to siatka kwadratowa  $5,0 \times 5,0$  m z przesunięciem fazowym  $2,5$  m co drugiego rzędu kolumn. Projektowana średnica kolumn wynosi od  $1,8$ – $2,20$  m. Ze względu na tolerancję wykonania kolumn do obliczeń przyjęto średnicę kolumny  $2,0$  m. Oczekiwany średni stopień zagęszczenia gruntu w kolumnie wynosi  $I_d = 0,50$ .



Rys. 4. Schemat rozmieszczenia kolumn wymiany dynamicznej (Menard Polska Sp. z o.o., 2010)

Fig. 4. Dynamic exchange column placement scheme

Z uwagi na wysoki poziom wody gruntowej i konieczność przygotowania stabilnego podłoża dla ciężkiego sprzętu do wykonania kolumn wymiany dynamicznej został użyty żużel o wskaźniku różnoziarnistości  $U = d_{60}/d_{10} \geq 7,5$  i o zawartości frakcji pylistych ( $d < 0,075$  mm) poniżej 3%. Ze względów technologicznych dopuszcza się mieszanie materiału platformy roboczej z materiałem wykorzystywanym do formowania kolumn wymiany dynamicznej.

Na odcinku od km 629+320 do km 629+785 zaprojektowano 825 sztuk kolumn o szacunkowej sumarycznej długości 3384 m.

## 1.2. Metodologia robót

Wzmocnienie gruntu rozpoczęło się na przygotowanej wcześniej platformie roboczej, ponieważ stan gruntu znajdującego się na poziomie terenu nie pozwalał na ruch ciężkiego sprzętu. Platforma robocza po wykonaniu robót stanowi część nasypu drogowego i musiała spełniać wymagania dotyczące gruntów stosowanych do nasypów drogowych.

Przed przystąpieniem do wykonania właściwych robót związanych z formowaniem kolumn wykonawca przeprowadził badania efektywności zagęszczania gruntu metodą wymiany dynamicznej na poletku próbnym o wymiarach  $30 \times 30$  m. Celem badań było ustalenie i dobór optymalnej energii (wysokości opadania i masy ubijaka).

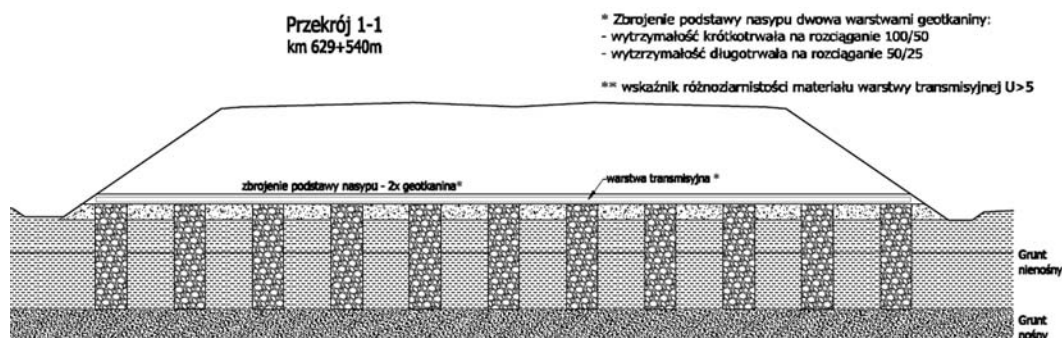
Schemat zagęszczania:

- a) zagłębianie dolnej części kolumny z gruntu platformy roboczej
  - wykonanie uderzeń z wysokości około 15–25 m – wprowadzenie kruszywa platformy roboczej do głębokości wody gruntowej,
  - wypełnienie powstałego krateru kruszywem;
- b) zagłębianie kolumny
  - wykonanie uderzeń z wysokości około 15–25 m – wprowadzenie kruszywa kolumny do głębokości wody gruntowej,
  - wypełnienie powstałego krateru kruszywem,
  - czynność powtarzana aż do momentu uzyskania wpędu ubijaka nie większego niż 0,2m oraz głuchego dźwięku sygnalizującego koniec formowania kolumny. (Wpęd oznacza zagłębienie się końcówki ubijaka po jednym uderzeniu.) Po otrzymaniu granicznej wartości wpędu uważa się kolumnę za uformowaną;
- c) zagęszczenie i powiększenie średnicy kolumny
  - wykonanie uderzeń z wysokości około 15–25 m – zagęszczenie kolumny i rozepchnięcie kruszywa – powodujące zwiększenie średnicy kolumny,
  - wypełnienie zanikającego krateru kruszywem do rzędnej platformy roboczej;
- d) zagęszczenie górnej części kolumny
  - pojedyncze uderzenie z wysokości pomiędzy 10 a 15 m.

Po wykonaniu wszystkich kolumn platformę roboczą wyrównano i zagęszczono powierzchniowo. Następnie została wykonana warstwa transmisyjna. Grubość warstwy wyrównawczej przyjęto na poziomie 50 cm, wykonanej z pospółki ułożonej w trzech warstwach: dolnej grubości 10 cm, środkowej grubości 30 cm i górnej grubości 10 cm. Pomiedzy warstwami ułożono geotkaninę o wytrzymałości krótkotrwałej na rozciąganie wzdłużne około 100 kN/m i rozciąganie poprzeczne około 50 kN/m. Warstwa transmisyjna została



zaprojektowana przy założeniu, że korpus nasypu drogowego jest stabilizowany spoiwem hydraulicznym. Przekrój przez nasyp po wykonanym wzmocnieniu ukazuje rysunek 5.



Rys. 5. Przekrój poprzeczny w km 629+540 (Menard Polska Sp. z o.o., 2010)

Fig. 5. Cross-section in 629+540 km

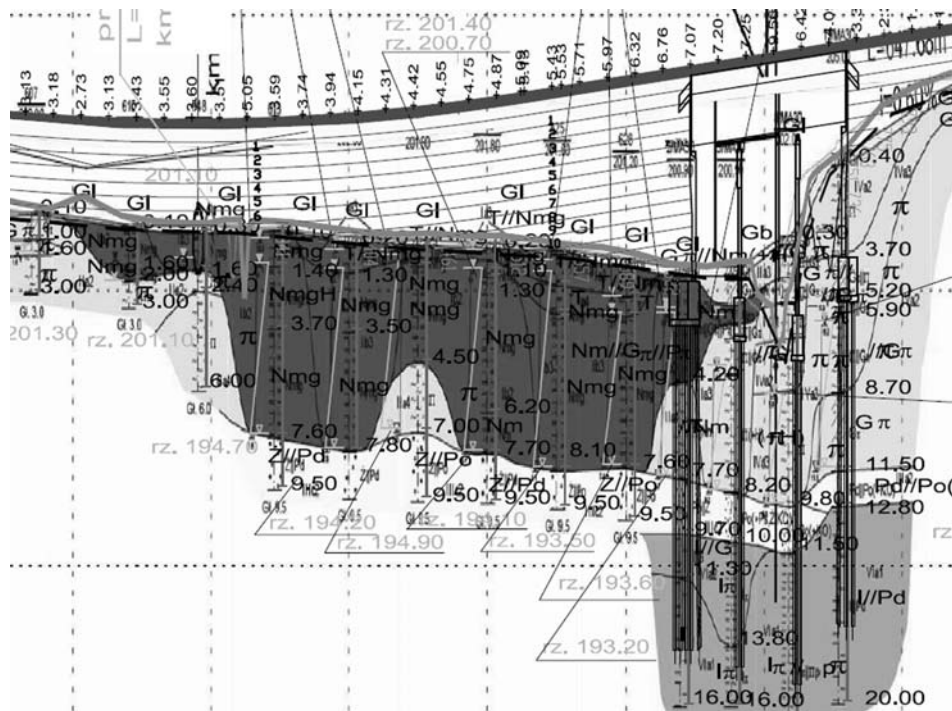
Przed wykonywaniem kolumn stwierdzono, że została zachowana odległość min. 30 m od najbliższych zabudowań. W przeciwnym wypadku zachodziłaby konieczność zbadania wrażliwości tych budowli na drgania oraz dokonania oceny ich aktualnego stanu. Wówczas należy lokalnie zmniejszyć energię uderzeń i/lub zastosować zabiegi ograniczające wpływ drgań (np. poprzez odseparowanie wzmocnianego terenu rowem o głębokości ok. 3 m).

W omawianym przypadku nie było to konieczne. Zastosowanie metody wymiany dynamicznej umożliwiło zrezygnowanie z budowy nasypu przeciążającego, co pozwoliło na skrócenie czasu robót.

## **2. Wzmocnienie podłoża gruntowego pod nasypami drogowymi w technologii kolumn CMC**

Tą metodą wykonano wzmocnienie m.in. na odcinku 643+200–643+640 ponieważ na podstawie wykonanych odwiertów geologicznych na omawianym odcinku trasy głównej stwierdzono w podłożu do głębokości 8,1 m występowanie gruntów organicznych – torfów i namulów w stanie plastycznym i miękkoplastycznym. Poniżej zalegały średnio zagęszczone żwiry. Wody podziemne występowały w postaci sączeń w obrębie torfów na głębokości 1,1–1,5 m. Warstwę wodonośną tworzyły żwiry z domieszką piasków. Zwierciadło wody napięte występowało na głębokości 7,0–8,1 m, a stabilizowało się na głębokości 0,4–1,6 m. W podłożu stwierdzono występowanie gruntów nienośnych i słabonośnych. Strukturę geologiczną tego odcinka przedstawiono na rysunku 6.

Z uwagi na niebezpieczeństwo wystąpienia nadmiernych lub nierównomiernych osiadań koniecznym okazało się zastosowanie wglębnego wzmocnienia podłoża gruntowego. Drugim czynnikiem była konieczność zabezpieczenia obiektu mostowego nad potokiem Olszanka, połączonego z przejściem dla zwierząt, przed zagrożeniami związanymi z brakiem stateczności podłoża. Bezpośrednie sąsiedztwo obiektu i wzmocnianego terenu wykluczyło metodę wymiany dynamicznej. Odpowiednim sposobem na zapewnienie wymaganego współ-



Rys. 6. Profil geologiczny trasy głównej w km 643+200–643+640 (Przedsiębiorstwo Geologiczne sp. z o.o., 2009)

Fig. 6. Main route geological profile in 643+200 ÷ 643+640 km

czynnika stateczności globalnej podłoża okazało się zastosowanie technologii wzmocnienia przemieszczeniowymi kolumnami betonowymi typu CMC. Proponowane wzmocnienie podłoża przy odpowiednio zastosowanym rygorze technologicznym gwarantowało uzyskanie małych osiadań resztkowych i odpowiednio wysokich współczynników stateczności globalnej.

### 2.1. Technologia wykonywania kolumn CMC

Wzmocnienie podłoża na przedmiotowym odcinku drogi polegało na stworzeniu przestrzennego kompozytu: wzmocniany grunt – kolumny betonowe CMC (kolumny o kontrolowanym module sztywności z ang. *Controlled Modulus Column*). Metodę tę cechuje brak ograniczeń związanych z warunkami gruntowymi. Zastosowanie kolumn CMC zapewnia wyraźne ograniczenie osiadań podłoża i znaczne zwiększenie współczynników stateczności podłoża gruntowego. W porównaniu ze wzmocnieniem kolumnami żwirowymi wzmocnienie kolumnami CMC umożliwia uzyskanie bardzo małych osiadań resztkowych, na ogół zbliżonych do wartości uzyskiwanych w przypadku posadowień na palach.

Do wykonania kolumn zastosowany został odpowiednio zaprojektowany świder przemieszczeniowy o średnicy od 330 mm do 500 mm, który rozpychając istniejący grunt

tworzył przestrzenie, w których zostały wykonane kolumny betonowe. Rozpychanie gruntu na boki jest korzystne ze względu na konsolidację materiału wokół tworzonej kolumny oraz eliminację robót związanych z wywozem i ewentualną utylizacją urobku, który powstaje podczas wyciągania świdra z klasycznym gwintem. Świder zamontowano na wiertnicy, umożliwiającej „wkręcenie” narzędzia wiertniczego we wzmacniane podłoże (bez wydobywania urobku na powierzchnię). Precyzyjne wykonanie otworu zapewniło maksymalną wartość tarcia na pobocznicach wykonanych kolumn i lepszą współpracę z otaczającym je gruntem. Po osiągnięciu wymaganej projektem głębokości, rozpoczął się proces formowania kolumny poprzez pompowanie mieszanki betonowej pod dużym ciśnieniem przez otwór umieszczony w rdzeniu świdra (fot. 3).

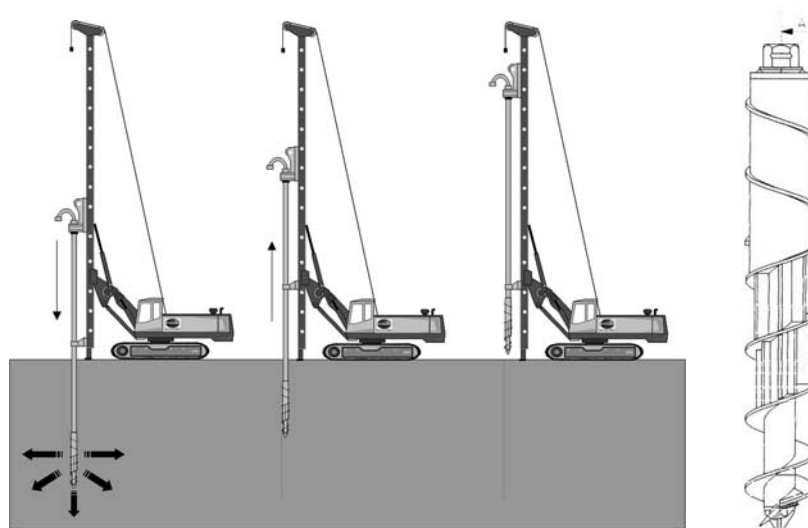


Fot. 3. Pompowanie mieszanki betonowej przez otwór umieszczony w rdzeniu świdra

Phot. 3. Concrete mix pumping through the hole placed in the drill core

Zakończenie etapu wiercenia kolumny (poprzedzającego betonowanie) nastąpiło w chwili zaobserwowania na urządzeniu rejestrującym wyraźnego wzrostu oporu wkręcania, co oznaczało osiągnięcie przez świder warstwy gruntu o większej nośności. Średnie zagłębienie kolumny w warstwie gruntu nośnego wynosiło od 0,5 m do 1,0 m w przypadku gruntu nośnego o  $q > 15$  MPa oraz od 3,0 m do 4,0 m w przypadku słabszych gruntów nośnych. Betonowanie kolumny wykonywano równoległe z podciąganiem wiertła do góry (przy jego jednoczesnym obrocie zgodnym z kierunkiem wiercenia) niemal natychmiast po przemieszczeniu gruntu poza obręb otworu. Dzięki temu wyeliminowano niebezpieczeństwo uszkodzenia ścian otworu podczas procesu wykonywania kolumny oraz uniknięto mieszania gruntu z podawaną mieszanką betonową. Kolumny były wykonywane z poziomu platformy roboczej, którą stanowiła warstwa gruntu niespoistego, najczęściej piasku lub pospółki, o miąższości od 0,5 do 2,0 m. Platforma stała się później częścią nasypu drogowego.

Jakość wykonania wzmocnienia oceniano na podstawie metryki kolumny, w której podaje się między innymi jej profil, pobór energii podczas wiercenia, moment obrotowy



Rys. 7. Schemat formowania kolumn CMC lub SCREWSOL (Menard Polska Sp. z.o.o., 2010)

Fig. 7. CMC or SCREWSOL column forming scheme

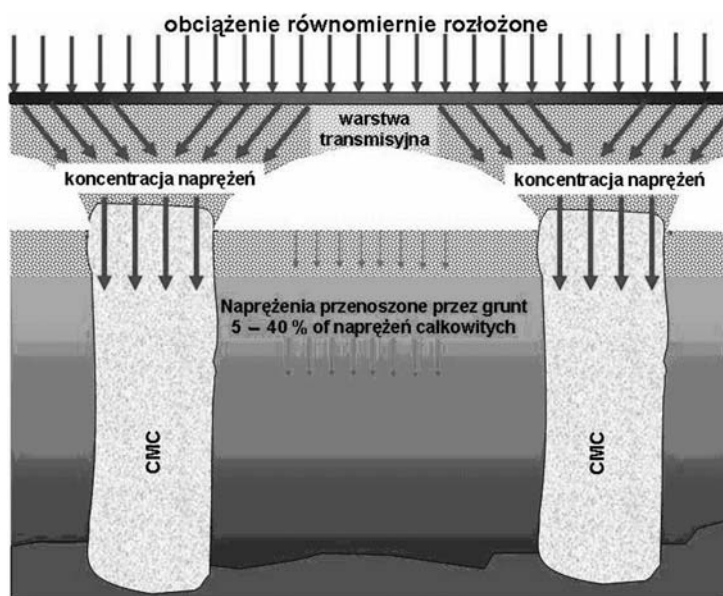
świdra, ilość zastosowanej mieszanki betonowej i ciśnienie podczas jej podawania. Inną metodą oceny jakości kolumn może być badanie ich ciągłości (PIT). Dokonano również oceny jakości wzmocnienia za pomocą próbnych obciążeń (fot. 4).



Fot. 4. Wykonywanie próbnych obciążeń kolumn CMC

Phot. 4. CMC column load test

Kolumny, w zależności od stosowanego medium wypełniającego i parametrów otaczającego je gruntu oraz ich rozmieszczenia, umożliwiają przejście wartości obliczeniowej nacisków jednostkowych na podłoże wynoszących od 300 do 400kPa, co odpowiada nasypom ziemnym o wysokości do 20 m (w tym przypadku ok. 7 m). Obciążenie przekazywane na podłoże jest przenoszone nie tylko przez kolumny, ale także przez otaczający je grunt, z którym współpracują. Słabe podłoże przenosi zazwyczaj od 5 do 40% obciążeń całkowitych. Aby obciążenie było rozłożone równomiernie zaprojektowano i wykonano odpowiednią warstwę transmisyjną (rys. 8).



Rys. 8. Rozkład obciążeń w podłożu wzmocnionym kolumnami CMC  
([www.menard.pl/\\_stara\\_strona/images/artykuly/200712iib\\_wzmocnienie\\_podloza\\_budynkow.pdf](http://www.menard.pl/_stara_strona/images/artykuly/200712iib_wzmocnienie_podloza_budynkow.pdf))

Fig. 8. Load distribution on the substrate reinforced by CMC columns

W miejscach występowania dużych sił osiowych lub momentów zginających kolumny betonowe zostały dodatkowo zbrojone dwuteowym kształtownikiem stalowym. Zbrojenie umieszczono w zabetonowanym rdzeniu kolumny bezpośrednio po zakończeniu formowania kolumny. Stalowe kształtowniki stanowiące zbrojenie skrajnych kilku rzędów kolumn, wprowadzano w świeżą mieszankę betonową przy użyciu wciągarki zamontowanej na palownicy lub oddzielnego urządzenia jak np. dźwigu czy koparki. W przypadku długiego zbrojenia/kształtownika, gdy opory pogrążania w betonie były znaczne, pogrążanie zbrojenia wspomagano wibratorem lub dociskano kształtownik koparką. Osadzone zbrojenie wkładano centrycznie i pionowo (fot. 5).

Na omawianym obszarze o powierzchni 22 020 m<sup>2</sup> zostało wykonane 4144 szt. kolumn CMC. Wybrane skrajne rzędy kolumn zostały zbrojone dwuteownikami IPE120.



Fot. 5. Kolumna CMC zazbrojona dwuteowym kształtownikiem stalowym

Phot. 5. CMC column reinforced by lock-bar steel section

## 2.2. Kolejność wykonywanych robót

### 1. Wykonanie platformy roboczej

Na obszarze, który został objęty wzmocnieniem ze względu na duże zabagnienie niezbędne okazało się wykonanie platformy roboczej, po której mógł poruszać się ciężki sprzęt, w tym pojazdy gaśnicowe o masie około 80 ton. Platforma o grubości około 1 m była również podstawą nasypu drogowego i została na niej wykonana warstwa transmisyjna, dlatego należało zagęścić ją powierzchniowo, aby uzyskać moduł odkształcenia  $E_{v2} > 40$  MPa.

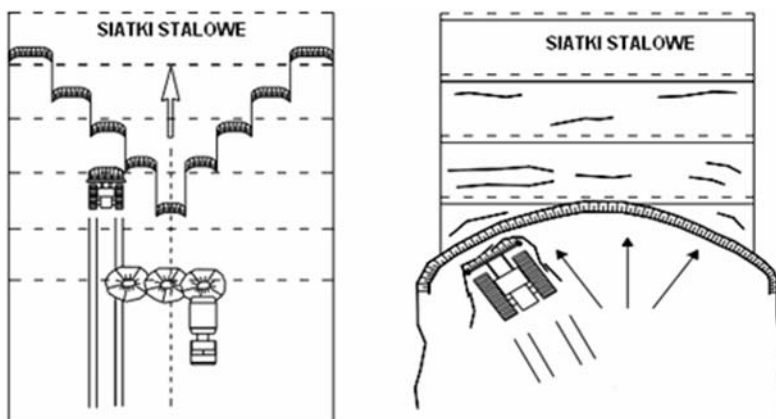
### 2. Wykonanie kolumn

Do wykonania kolumn użyto jako medium nośne mieszanek betonową. Ze względu na sposób wzmocnienia podłoża – kompozyt gruntu i kolumny – moduły sztywności nie były zbyt wysokie, aby mogły dobrze współpracować z gruntem. Minimalne zagłębienie kolumny w stropie gruntów nośnych poniżej spągu gruntów słabonośnych  $L_{min.} = 0,5-4,0$  m. Zaprojektowano rozstaw kolumn w siatce kwadratowej o wymiarach  $1,45 \times 1,45$  m do  $2,6 \times 2,6$  m. Pod skarpami nasypów zaprojektowano i wykonano kolumny w rozszerzonej siatce prostokątnej.

Technologia CMC umożliwia kontrolę oporu pogrążania narzędzia wiertniczego, dlatego w przypadku stwierdzenia niedużych oporów wkręcania, kolumny wydłużano do uzyskania oporów świadczących o odpowiednim pogrążeniu podstawy kolumny w warstwie gruntów nośnych. Natomiast, gdy uzyskano opory wkręcania świadczące o osiągnięciu gruntów nośnych, mimo nie uzyskania zakładanej na poszczególnych poletkach długości kolumn, skracano je.

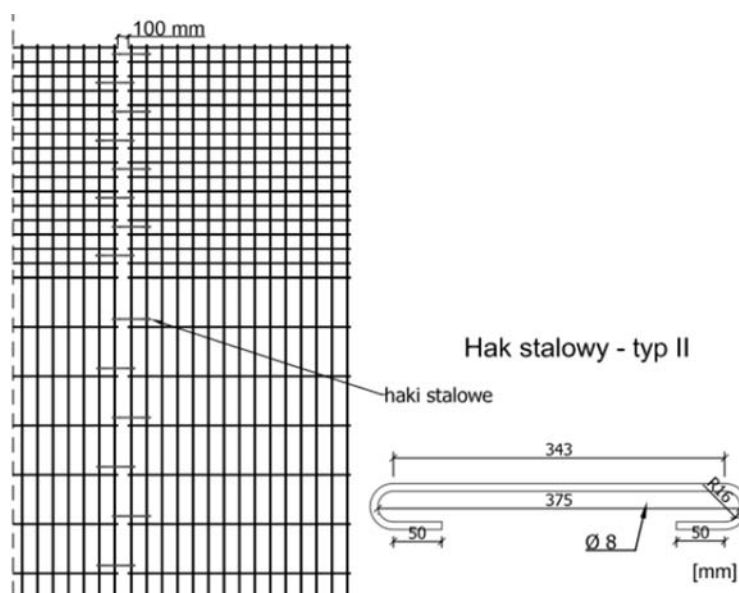
### 3. Wykonanie warstwy transmisyjnej

Po zakończeniu prac związanych z instalacją kolumn CMC rozłożono warstwę materiału zasypowego o grubości 30 cm. W trakcie prac obowiązywał bezwzględny zakaz poruszania się ciężkiego sprzętu budowlanego (zwłaszcza koparek gąsienicowych, spychaczy, walców wibracyjnych) bezpośrednio po głowicach kolumn CMC, aby nie doprowadzić do ich zniszczenia. Materiał zasypowy rozkładano i zagęszczano metodą od czoła zgodnie z rysunkiem 9.



Rys. 9. Metody rozkładania materiału nad głowicami kolumn oraz nad siatkami stalowymi (Menard Polska Sp. z o.o., 2010)

Fig. 9. Material spreading method over the column cap and steel mesh



Rys. 10. Sposób łączenia siatek stalowych (Menard Polska Sp. z o.o., 2010)

Fig. 10. Method of connecting steel mesh

Po zasypaniu głowic kolumn i zagęszczeniu zasypki rozpoczęto układanie siatek stanowiących wzmocnienie warstwy transmisyjnej. Siatki stalowe układano zgodnie z projektem technologicznym, umieszczając właściwy typ siatki w odpowiednim miejscu. Prace prowadzono tak, aby uchronić siatkę stalową przed uszkodzeniem i ewentualną deformacją. Siatki stalowe układano z zakładem min 1,5 m w kierunku prostopadłym do osi nasypu. Sąsiednie pasma siatek stalowych łączono hakami stalowymi. Rozstaw i ilość haków odpowiadał ilości prętów rozdzielczych. Haki stalowe umieszczano na przemian według schematu przedstawionego na rysunku 10.

Podobnie, jak w przypadku wykonania kolumn, tak samo po rozłożeniu siatek stalowych obowiązywał zakaz poruszania się maszyn budowlanych bezpośrednio po rozłożonych siatkach. Ruch maszyn był możliwy po wcześniejszym rozłożeniu min. 30 cm warstwy gruntu nasypowego. Zagęszczanie warstwy transmisyjnej odbywało się bez udziału wibracji. Grunt dogęszczono poprzez odpowiednią ilość przejazdów walca. Siatki zostały ułożone tak, aby nie wystawały z nasypu, w razie potrzeby zwiększano długość zakładu siatek zewnętrznych (fot. 6).



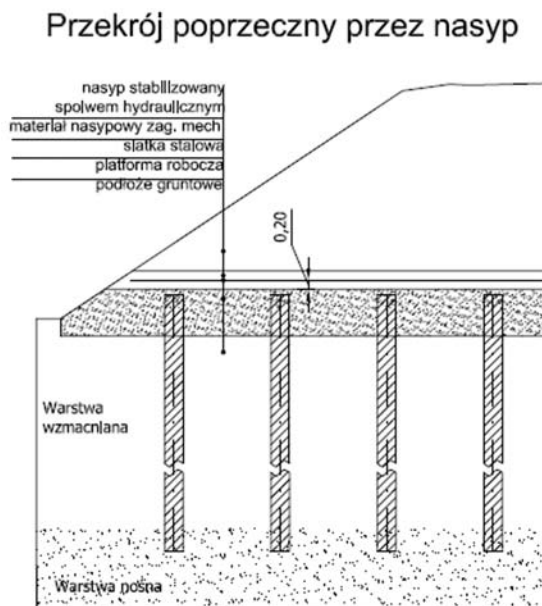
Fot. 6. Warstwa transmisyjna wzmocniona siatkami stalowymi

Phot. 6. Transmission layer reinforced with steel mesh

#### 4. Wykonanie nasypu drogowego

Po wykonaniu wzmocnionej warstwy transmisyjnej uzyskano wymagane parametry nośności i zagęszczenia podłoża i przystąpiono do wykonywania nasypu drogowego, który na tym odcinku został zaprojektowany z gruntów stabilizowanych spoiwami hydraulicznymi.





Rys. 11. Przekrój poprzeczny przez nasyp wzmocnionego obszaru (Menard Polska Sp. z.o.o., 2010)

Fig. 11. Cross-section through the reinforced ground embankment

### **Podsumowanie**

Trasę autostrady A4 poprowadzono przez teren geologicznie obfity w grunty słabonośne. Opisane powyżej metody wzmocnienia podłoża zostały wielokrotnie zastosowane przez firmę BUDIMEX S.A. na odcinku 25 km. Należy zauważyć, że na wielu obszarach wykonywane były również tradycyjne wymiany gruntu. Niestety, konwencjonalne wymiany gruntu niosą ze sobą następujące ograniczenia:

- na terenach zabagnionych nie ma możliwości operowania ciężkim sprzętem dla wykonania wymiany gruntu,
- na dużych obszarach wywóz wymienianego gruntu oraz dowóz materiału o lepszych właściwościach wiąże się z dużymi kosztami transportu oraz dużym obciążeniem dróg lokalnych, które nie są do tego dostosowane, gdyż autostrada A4 przebiega nowym śladem głównie przez tereny rolnicze o nierozwiniętej infrastrukturze drogowej,
- brak miejsca na składowanie wymienianego gruntu, gdyż cała inwestycja musi się zmieścić w granicach wyznaczonych wzdłuż trasy głównej,
- czas trwania tradycyjnej wymiany gruntu jest uzależniony od warunków pogodowych, gdyż w podmokłym terenie transport wymienianego gruntu jest niemożliwy.

Z uwagi na rodzaj gruntów występujących na tym obszarze można z całą pewnością stwierdzić, że wykonanie tej inwestycji w założonym terminie bez nowoczesnych metod

wzmacniania gruntu byłoby niemożliwe. Biorąc pod uwagę fakt, że na terenie Polski słabonośne grunty występują często, należy nowoczesne metody wzmocnienia podłoża stosować powszechnie i nieustannie je doskonalić, aby krajowa sieć dróg miała szansę na rozwój w tempie zbliżonym do standardów europejskich.

### *Literatura*

- Wiłun Z., 2007 – Zarys geotechniki. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności WKŁ, Warszawa.
- Projekt wykonawczy budowy autostrady A4 na odcinku Jarosław węzeł „Wierzbna” (bez węzła) – Radymno (z węzłem) km 621+800,67–647+455,82, Transprojekt Gdański Sp. z o.o., 2010.
- Projekt technologiczny wzmocnienia podłoża gruntowego pod nasypami drogowymi w technologii kolumn wymiany dynamicznej na odcinku od km 629+320 do km 629+785, Menard Polska Sp. z o.o., 2010.
- Projekt technologiczny wzmocnienia podłoża gruntowego pod nasypami drogowymi w technologii przemieszczeniowych zbrojonych kolumn CMC na odcinku od km 643+200 do km 643+640, Menard Polska Sp. z o.o., 2010.
- Dokumentacja geologiczno-inżynierska dla autostrady A-4 na odcinku Jarosław (węzeł Wierzbna) – Korczowa od km 621+930,00 do 668+837,65, Przedsiębiorstwo Geologiczne Sp. z o.o., 2009.