



KRZYSZTOF  
GRADKOWSKI

Politechnika Warszawska



KRZYSZTOF  
WYSZYŃSKI

J&P-AVAX S.A.

## Ulepszanie i wzmacnianie warstw gruntów ubocznymi materiałami spalania i odpadowymi w drogowych budowlach ziemnych

Budowa odpowiedniej struktury budowli ziemnych aktualnie realizowanych odcinków dróg szybkiego ruchu stwarza szereg nie dających się przewidzieć problemów.

Skuteczne rozwiązanie problemów technologii budowy w dużej mierze zależy od wykorzystania lokalnych zasobów surowcowych, które często stanowią uboczne produkty spalania (UPS) lub odpady przemysłu wydobywczego.

W okresie kilku ostatnich lat, inicjatywy mające na celu rozpoznanie nowych materiałów i technologii przy-

datnych w budownictwie drogowym w mniejszym stopniu są podejmowane przez ośrodki naukowo-badawcze, a w większym stopniu przez duże konsorcja wykonawców inwestycji drogowych, finansujące prace doświadczalne i badawcze.

Większość wykonawców dużych inwestycji drogowych nastawiona jest na poszukiwanie optymalnych kosztów materiałowych, także poprzez stosowanie materiałów odpadowych z innych procesów produkcyjnych.

Dokumentacje techniczne poszczególnych kontraktów zawierają wymagania techniczne odnośnie do finalnej konstrukcji budowli ziemnych niemal dla wszystkich kategorii projektowania geotechnicznego, przewidzianych w *Eurokodzie 7* [4]. Na ogół dokumentacje te ustalają ogólne parametry gruntów, wtórny moduł odkształcenia  $E_2$  lub wskaźnik odkształcenia  $I_0$ , oraz wskaźnik zagęszczenia  $I_s$ , w zależności od poziomu wysokości lub głębokości realizowanej budowli ziemnej, w tym i dla warstwy stanowiącej bezpośrednio podłoże nawierzchni drogowej.

Ścisłejsze wymagania odnośnie do konkretnych gruntów czy kruszyw są formułowane tylko w przypadkach dużych zadań inwestycyjnych.

Ogólnie znane są opracowania dotyczące wykorzystania popiołów lotnych w budownictwie drogowym, do których odnoszą się aktualnie normy [2] i [3]. Zastosowanie popiołów lotnych w ziemnym budownictwie drogowym ma już kilkudziesięcioletnią tradycję, zarówno w kraju jak i za granicą. Klasyfikacja popiołów lotnych, zawarta w wyżej wymienionych normach obejmuje wszystkie rodzaje popiołów niezależnie od technologii spalania węgla i odsiarczania spalin. Pewna część znacznych zasobów popiołów lotnych zużywana jest w produkcji betonów cementowych, dla których opracowano szereg dodatków pozwalających na przystosowanie właściwości popiołów do takich zastosowań, oraz w produkcji spoiw hydraulicznych stosowanych m.in. do stabilizacji gruntów. Problemem jest jednak różnorodność właściwości popiołów lotnych i zmienność ich parametrów, a niekiedy

i wieloletnia aktywność reakcji chemicznych podczas składowania. Stąd też występują trudności w opracowaniu krajowych wymagań, uzupełniających wymienione wyżej normy, a szczególnie odnoszących się jednocześnie do poszczególnych składowisk. Wymagania takie, np. w formie załączników krajowych (NA) do Norm Europejskich powinny być opracowane przez poszczególne kraje Unii Europejskiej w dostosowaniu do lokalnych warunków, tradycji technicznej itp. [6],[7].

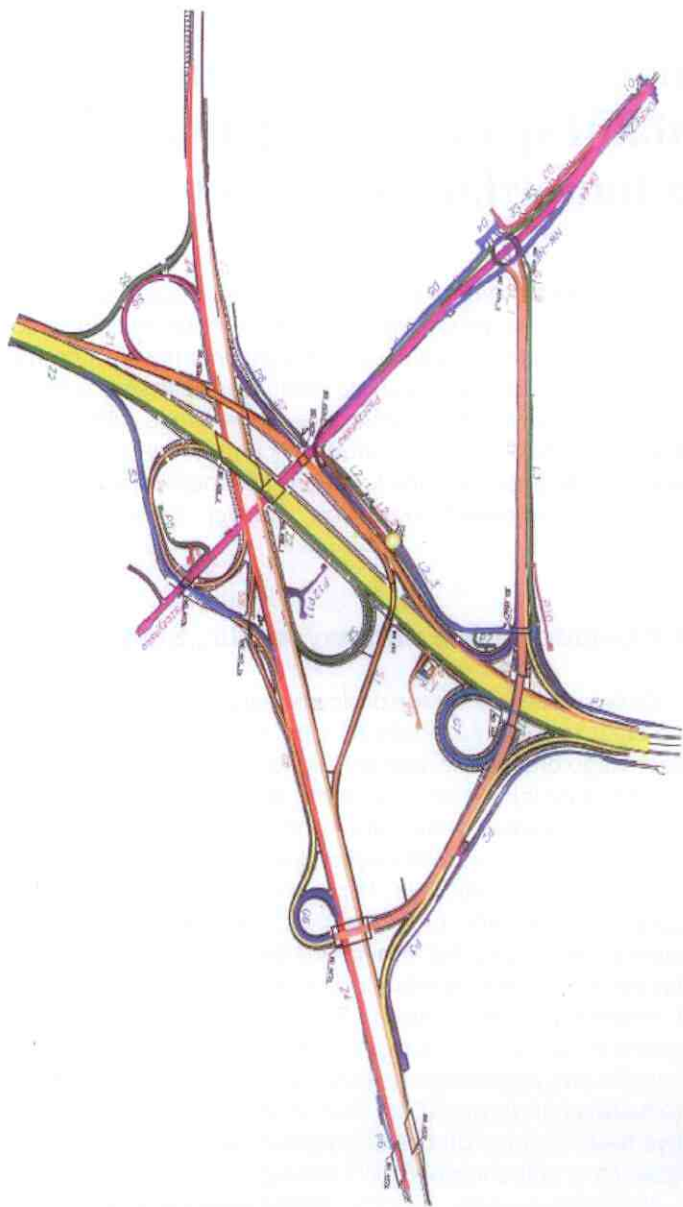
### Doświadczenia z budowy węzła „Sośnica”

Doświadczenia zebrane podczas realizacji węzła „Sośnica” na skrzyżowaniu autostrad A1 i A4, opisane w [1], warte są szerszego omówienia, bowiem są dobrym przykładem wykorzystania na tej budowie lokalnych zasobów ubocznych produktów spalania i materiałów odpadowych obróbki węgla kamiennego. Duży zakres wykonanych robót ziemnych i skala tego skrzyżowania (rys. 1) pozwala nie tylko na popularyzację zastosowanych technologii, ale również dostarcza wskazówek pozwalających na uniknięcie pewnych trudności i przeszkód w wykorzystaniu ubocznych produktów spalania i materiałów odpadowych. Roboty obejmujące wymianę gruntów podłoża z zastosowaniem mieszanki kruszywa z łupka przywęglowego nieprzeżalonego i popiołów lotnych (o nazwie handlowej GEO-UTEX) z użyciem mieszarek mogą być także wzorem do naśladowania na wielu budowach drogowych w południowej części naszego kraju.

Na budowie węzła „Sośnica” zastosowano kruszywo, o nazwie handlowej GEO-UTEX, o uziarnieniu ciągłym 0/63 z dodatkiem hydraulicznego spoiwa drogowego o nazwie handlowej SOLITEX. Kruszywo GEO-UTEX wytwarzane jest w odmianach A(A1,A2,A3 i A4) – w półsuchym odsiarczaniu spalin aktywnych popiołów lotnych i B – z dodatkiem nieaktywnych popiołów lotnych. W zależności od odmiany kruszywa GEO-UTEX producent deklaruje uzyskanie wskaźnika nośności  $w_{nos}$  (CBR) bezpośrednio po zagęszczeniu od 25% do 80%. Uziarnienie poszczególnych odmian kruszywa GEO-UTEX przedstawiono na rysunku 2. SOLITEX jest to mineralne spoiwo hydrauliczne złożone z materiałów wiążących na bazie cementu i aktywnych wypełniaczy pucolanowych, głównie krzemionkowych popiołów lotnych ze spalania węgla kamiennego. Spoiwo to (wytwarzane w dwóch klasach) charakteryzuje się początkiem wiązania po 2 godzinach, zaś koniec procesu wiązania następuje po 12 godzinach.

Wytwarzanie mieszanki kruszywa GEO-UTEX może odbywać się zarówno w obrębie placu budowy, na który dowożone są poszczególne jej składniki, jak i w stacjonarnych mieszarkach, zlokalizowanych w pobliżu składowisk łupka przywęglowego nieprzeżalonego. Decydujący jest ogólny koszt wy-





Rys. 1. Ogólny układ węzła „Sośnica” na skrzyżowaniu autostrad A1 i A4

konania odpowiedniej warstwy wzmocnionej, która najczęściej zastępuje warstwę nieprzydatnego gruntu lokalnego. Znaczącą redukcję tego kosztu można uzyskać przez zastosowanie „in situ” mieszarek „mikser – recyklar”, w zespole maszyn, które w sposób ciągły wykonują ulepszoną i wzmocnioną spoiwem warstwę na zadanym poziomie danej budowli ziemnej.

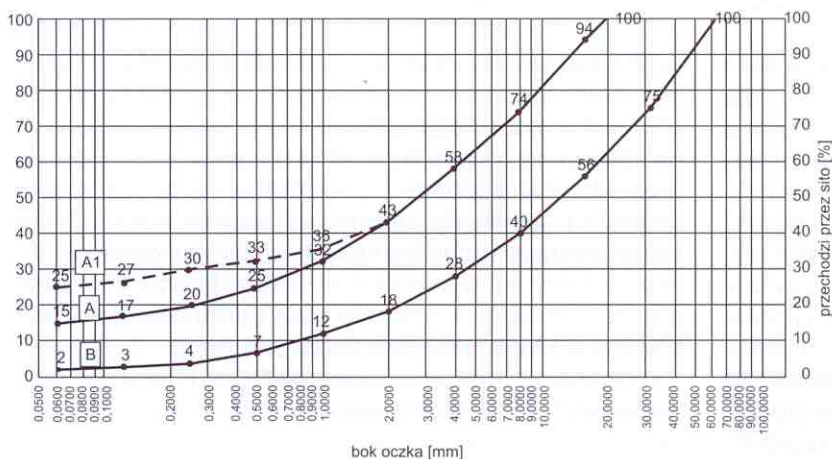
Kruszywa GEO-UTEX mogą być wykorzystywane zarówno do ulepszania podłoża budowli ziemnych czyli jego wymiany, jak to ma miejsce w przypadku niektórych wykopów, jak i do wykonywania poszczególnych warstw wznoszonego nasypu.

W dyspozycji kierownictwa budowy węzła „Sośnica” znajdowały się hałdy łupków w różnych, niezbyt odległych od siebie lokalizacjach o właściwościach podanych w tabeli 1. Porównując zestawione w tej tabeli właściwości poszczególnych rodzajów łupków można spostrzec, że łupek przepalony (czerwony) ma zdecydowanie korzystniejsze parametry od łupka nieprzepalonego (poz. 1 i 2 w tab. 1).

Łupek przywęglowy przepalony (czerwony) jest od kilku do kilkunastu razy droższy od łupka nieprzepalonego (czarnego) w zależności od miejsca jego zakupu. Stąd też występuje większe zainteresowanie łupkiem nieprzepalonym jako kruszywem i sposobami jego wbudowania w strukturę drogowych budowli ziemnych. Na budowie węzła „Sośnica” użyto głównie łupek czarny nieprzepalony z KWK Sośnica, dowożony z hałdy (po wybudowaniu przeprawy mostowej, fot.1.) lub bezpośrednio z zakładu sortowniczego kopalni.



Fot. 1. Transport łupka czarnego na budowę węzła „Sośnica”



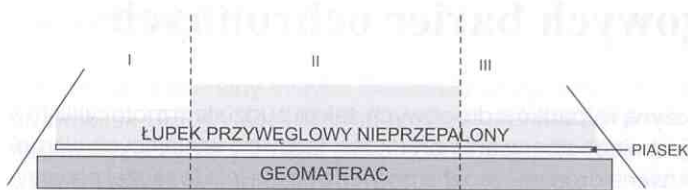
Rys.2. Wymagane uziarnienie kruszyw GEO-UTEX według [7]

W celu sprawdzenia opracowanej technologii zastosowania łupka nieprzepalonego, w pierwszej fazie wykonano odcinki próbne, na których określono także sposoby zagęszczania poszczególnych rodzajów gruntów i kruszyw oraz zakresy uzyskiwanych wskaźników zagęszczeń. Pozwoliło to na opracowanie przez wykonawcę odpowiedniego programu zapewnienia jakości „PZJ”. Program ten przewidywał, między innymi, że nasypy drogowe będą wznoszone w trzech fazach o równoległym postępie robót, schematycznie ujętych na rysunku 3. Oznaczona na tym rysunku warstwa piasku żużlowego (o grubości 5 cm) zapewniała wyrównanie ze strukturą geomateraca.



Tabela 1. Zestawienie właściwości łupków zlokalizowanych na hałdach w pobliżu budowy węzła „Sośnica”

Lp.	Pochodzenie Cecha	$\rho_{d \max}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$w_n$ %	Frakcja <0,075 mm %	$C_U$ $d_{60}/d_{10}$	$w_{nos} (CBR)$ dla $I_s=1$	$W_p$	Straty prażenia %
			$w_{opt}$ %					
1	Łupek przywęglowy nieprzepalony KWK Sośnica	1,784	8,5	7,2	85,2	-	21,6	16,3
			8,4					
2	Łupek przywęglowy nieprzepalony KWK Knurów	1,823	9,2	7,6	122	-	22,4	15,8
			9,4					
3	Łupek przywęglowy przepalony Hałda Gliwice	9,8	9,8	9,3	56,9	-	22,8	(8,4)
		1,824	9,7					
4	Łupek przywęglowy przepalony KWK Makoszowy	1,714	-	8,8	14,6	48,4	36,5	-
			15,5					
5	Łupek przywęglowy przepalony KWK Pstrowski	1,672	15,9	6,5	61	38,4	72,1	-
			16,4					
6	Łupek przywęglowy przepalony KWK Marcel Radlin	1,666	12,9	5,9	56	34,5	43,2	-
			13,2					
7	Łupek przywęglowy przepalony KWK Pstrowski – Mikulczyce	1,665	14,2	5,8	56,4	38,4	14,2	-
			17,2					
8	Łupek przywęglowy przepalony KWK Makoszowy Zabrze	1,714	-	8,8	14,6	48,4	36,5	-
			15,5					



Rys. 3. Fazy wykonywania nasypów

W fazach I i III roboty polegały na zagęszczeniu warstwy nasypu w strefie przyskarpowej. Po uzyskaniu na tej warstwie nasypu wymaganego zagęszczenia trwały prace związane z zawinięciem pasm geosiatki i zamocowaniem jej do podłoża. Mocowanie geosiatki do podłoża zostało wykonane zgodnie z zaleceniami producenta geosyntetyku. W fazie II zagęszczana była warstwa nasypu w jego środkowej części. Zagęszczenie poszczególnych warstw nasypu było wykonywane zgodnie z ustaleniami poczynionymi na odcinkach próbnych. Dopuszczano też możliwość, w której postęp robót fazy II mógł być bardziej zaawansowany w stosunku do robót z pozostałych faz. W tym przypadku warstwa wykonanego nasypu w strefie środkowej mogła być wyższa maksymalnie o jedną grubość warstwy ułożonego nasypu w stosunku do faz I lub III.

Wykonawca mógł przystąpić do wbudowywania kolejnych warstw nasypu dopiero po stwierdzeniu przez nadzór prawidłowego wykonania warstw poprzednich. Na węźle „Sośnica” materiał łupkowy wbudowywano warstwami grubości 0,4–0,5 m zgodnie z SST i PZJ, a po uzyskaniu wymaganych parametrów wykonywano warstwę separacyjną grubości 0,10 m z gruntu spoistego, stanowiącą izolację i barierę zabezpieczającą przed ewentualnością samozapłonu w wysokich nasypach w trakcie eksploatacji. Rozwiązanie to było dodatkowym zabezpieczeniem, niezależnie od faktu, że łupki czarne były

badane na bieżąco pod względem zawartości części palnych. Jedno badanie przypadało na 3000 m<sup>3</sup> lub na 10 000 m<sup>3</sup>. Podczas badania wyprężania łupków czarnych dopuszczalne straty mogły wynieść od 20 do 30%. Próbki były pobierane z materiału na hałdzie, ładowanego na środki transportowe oraz po przewiezieniu na miejsce jego wbudowania. Górną warstwę nasypów budowli ziemnych stanowiła warstwa mrozochronna o grubości 30 cm, będąca mieszanką pospółki i czerwonego łupka.

Pod nią znajdowała się warstwa technologiczna o grubości 20 cm. W związku z powyższym, do poziomu niwelety nasypy były wykonywane z łupka przywęglowego nieprzepalonego. Jednakże w przypadkach występowania niesprzyjających warunków atmosferycznych (intensywne opady) warstwa technologiczna nasypu, grubości 20 cm, została wykonana z mieszanki kruszywa GEO-UTEX odmiany A-2, piasków żużlowych lub innych sprawdzonych materiałów.

Innym, ważnym zastosowaniem spoiwa SOLITEX na budowie węzła „Sośnica” była dodatkowa stabilizacja wykonanych już warstw nasypu po intensywnych opadach atmosferycznych. Wówczas niezbędne było szybkie osuszenie tych warstw nasypu przed wbudowaniem kolejnej warstwy, bowiem warunki kontraktowe narzucały wykonawcy niezwykle krótki czas realizacji robót, co nie pozwalało na przedłużanie oczekiwania na sprzyjające warunki pogodowe i naturalne osuszenie gruntu. Często w takich przypadkach, wymagane przez SST parametry kolejnych warstw nasypów osiągnano przy zastosowaniu 20–30% dodatku tego spoiwa. W przypadku wbudowywania mieszanek kruszywa GEO-UTEX ze spoiwem SOLITEX, przygotowanych w stacjonarnych mieszarkach, dodatek spoiwa wynosił około 20% wagowo.

Podłoże budowli ziemnej wzmacniano również przez stabilizację gruntów spoiwem o nazwie handlowej SILMENT CQP-15, opisanym na przykład w publikacjach [5], [7]. Wyrób ten jest spoiwem hydraulicznym, które przez odpowiednie zestawienie komponentów pozwala na równie skuteczne, a nawet szersze zastosowanie niż tradycyjne cementy w zależności od właściwości gruntów rodzimych. Mieszanki gruntu ze spoiwem SILMENT CQP-15 uzyskują wytrzymałość co najmniej 15 MN/cm<sup>2</sup>, nawet w przypadku gruntów zawiłgocnych ponad  $w_{opt}$ , co stanowi główną konkurencyjność tego spoiwa. Problem stanowią jednak grunty o znacznej zawartości frakcji pylasto-ilastych, z których mieszanki są trudno

urabialne. Największą skuteczność i jakość ulepszonych warstw przy zastosowaniu CQP-15 uzyskiwano przy wzmocnieniu podłoża w gruntach spoistych, nawet o przekroczonej wilgotności optymalnej. Nieco gorsze rezultaty uzyskiwano w gruntach piaszczystych i o wilgotności mniejszej od wilgotności optymalnej.

## Podsumowanie

Lokalne zasoby materiałów odpadowych stwarzają często możliwości zastosowania optymalnego zarówno pod względem ekonomicznym, jak i poprawnego technicznie. Do takich materiałów z pewnością należą popioły i łupki przywęglowe. Dodatkowym, ale bardzo istotnym, aspektem wykorzystania tych materiałów jest kwestia ochrony środowiska i redukcji jego zanieczyszczeń. Zastosowanie produktów ubocznego spalania i odpadów wstępnej obróbki węgla kamiennego pozwala na skuteczniejszą weryfikację bilansu zasobów kruszyw

naturalnych w kraju. Relatywnie niska cena takich materiałów pozwala na optymalizowanie kosztów wykonania drogowych budowli ziemnych.

## Bibliografia

- [1] Gradkowski K., Wyszyński K.: *Budowle ziemne węzła skrzyżowania autostrad A1 i A4*. „Magazyn Autostrady” 8-9, 2009, s. 24–26
- [2] PN-EN 14227-3 Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym. Mieszanki związane popiołem lotnym
- [3] PN-EN 14227-4 Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym. Popiół lotny do mieszanek stabilizowanych hydraulicznie
- [4] PN-EN 1997-1 i 2 Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne
- [5] Sajdak-Chudzik D.: *Grunt to stabilizacja*. „Infrastruktura” 7–8, 2008, s. 27–29
- [6] Szczygielski T.: *Uboczne produkty spalania w drogownictwie. Normy a aprobaty techniczne*. „Magazyn Autostrady” 10, 2009, s. 72–75
- [7] Zastosowania ubocznych produktów spalania (UPS) w budownictwie. Zbiór referatów V warsztatów 19–22 stycznia 2009, Sillian, Austria

