

CEZARY KRASZEWSKI<sup>1)</sup>  
JAN PACHOWSKI<sup>2)</sup>

## WYKORZYSTANIE PRZETWORZONYCH OSADÓW PORAFINERYJNYCH DO STABILIZACJI GRUNTÓW W BUDOWNICTWIE DROGOWYM

### Cz. II - Badania odcinków doświadczalnych<sup>3)</sup>

**STRESZCZENIE.** Stwierdzone w badaniach rozpoznawczych właściwości stabilizacyjne przetworzonych osadów porafineryjnych dały podstawę do wykonania i badań odcinków doświadczalnych w terenie. W badaniach odcinków obok aspektu technicznego uwzględnione zostały przepisy z zakresu ochrony środowiska. Temat badawczy jest realizowany w ramach polsko-duńskiego projektu EUREKA – Soilstabsorbent we współpracy z Politechniką Warszawską, Politechniką Wrocławską, Narodową Fundacją Ochrony Środowiska – Zakład Usług Ekologicznych w Płocku - Ekoglobe.

Przeprowadzone badania wykazały, że grunty stabilizowane niewielkim dodatkiem przetworzonego osadu porafineryjnego w ilościach 2-9% uzyskują wzrost wskaźnika nośności  $w_{noś}$  podobnie jak przy stabilizacji gruntów wapnem hydratyzowanym.

Ponadto dodatek ten wpływa korzystnie na zmianę stopnia wysadzinowości gruntów spoistych i małospoistych.

<sup>1)</sup> mgr inż. – Instytut Badawczy Dróg i Mostów w Warszawie

<sup>2)</sup> prof. dr inż. – Instytut Badawczy Dróg i Mostów w Warszawie

<sup>3)</sup> kontynuacja artykułu opublikowanego w nr 4/2003

## 1. WSTĘP

Przeprowadzone dotychczas próby zestalenia wapnem palonym mielonym uwodnionych osadów porafineryjnych w instalacji ORTWED do postaci proszku lub granulatu wykazały możliwość przetworzenia osadów do postaci umożliwiającej ich łatwiejsze zagospodarowanie [1]. Instalację ORTWED zainstalowaną w Płocku przy PKN ORLEN jako tymczasową przedstawia rysunek 1.



Rys.1. Instalacja tymczasowa do zestalenia osadów petrochemicznych ORTWED zainstalowana w Płocku

Fig.1. System ORTWED for solidifying petrochemical deposits installed in Płock

Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 27.IX.2001r. w sprawie katalogu odpadów [2, 3] wprowadza katalog odpadów, który określa:

- grupy odpadów w zależności od źródła ich powstawania,
- podgrupy i rodzaje odpadów oraz ich kody,
- listę odpadów niebezpiecznych,
- sposób klasyfikowania odpadów.

Zgodnie z ww. Rozporządzeniem nieprzetworzone osady porafineryjne zaliczyć należy do grupy odpadów niebezpiecznych o kodzie identyfikacyjnym uzależnionym od zawartości związków ropochodnych:

- 05 01 09\* – osady z zakładowych oczyszczalni ścieków zawierające substancje niebezpieczne i zawartości ropochodnych do 12%,
- 19 08 10\* – tłuszcze i mieszaniny olejów z oczyszczania ścieków o zawartości ropochodnych do 5%.

Podjęte w ramach polsko-duńskiego projektu EUREKA- Soilstabsorbent badania nad zastosowaniem przetworzonych osadów porafineryjnych obejmowały dwa kierunki.

Pierwszy kierunek to badania gruntów stabilizowanych przetworzonym osadem, który jest tematem niniejszego artykułu, drugi to badania popiołów z odsiarczania spalin w instalacji, w której przetworzone osady zostały zastosowane jako sorbent.

Przedstawione wyniki dotyczą osadów porafineryjnych o kodzie 19 08 10\* przetworzonych w skali technicznej w wytwórni zlokalizowanej przy PKN ORLEN w Płocku. Badania były prowadzone w następujących kierunkach:

- badania pod kątem oddziaływania przetworzonego osadu oraz instalacji utylizującej na środowisko prowadzone przez Politechnikę Warszawską, Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Budownictwa,
- badania nad przydatnością przetworzonego osadu jako spoiwa do stabilizacji gruntów przeprowadzone przez IBDiM.

Przetworzony osad na spoiwo do stabilizacji gruntów dla celów drogowych powinien stanowić sypki proszek o wilgotności do 5%. Tak mała wilgotność jest wymagana w celu osuszenia gruntu co sprzyja wzrostowi nośności. Także ze względów transportowych jest to element bardzo istotny. Aktualnie w drogownictwie na szeroką skalę stosuje się metodę stabilizacji gruntów na miejscu za pomocą frez drogowych. Dotyczy to stabilizacji cementem lub wapnem. Metoda polega na tym, że spoiwo w założonych ilościach rozkładane jest na gruncie za pomocą specjalnej rozkładarki. Do rozkładarek spoiwa są tankowane pneumatycznie z cementowozów co wymaga, aby transportowane spoiwa były suche.

## 2. WŁAŚCIWOŚCI PRZETWORZONYCH OSADÓW

Do badań były pobierane próbki w różnych okresach produkcji. W początkowej fazie produkcji badania wykazały, że przetworzony osad charakteryzuje się znaczną zmiennością. Zmienność dotyczyła kolorystyki, zawartości CaO i wilgotności. Przetworzony osad cechował się zbyt małą zawartością CaO i związaną z tym niską aktywnością i wysoką wilgotnością. Następnie, po zwiększeniu dodatku wapna palonego do uwodnionych osadów zaolejonych uzyskiwano jednorodny produkt przetworzenia, który był badany pod kątem zastosowania w odcinkach doświadczalnych.

Jak opisano powyżej, w początkowej fazie przetwarzania uzyskiwano produkt o dużej wilgotności koloru ciemnobrunatnego, dalej nazwany produktem ciemnym – próbka 1. Wynikało to z niejednorodności dozowania wapna, jak również dużej zmienności surowca – zaolejonych osadów. W późniejszym okresie powstawał produkt lepszej jakości, o większej zawartości CaO, zwany produktem jasnym – próbka 2.

W celu ustalenia niezbędnego dodatku wapna palonego do półpłynnego osadu w Laboratorium IBDiM wykonano wzorce zawierające 15÷40% CaO. Badanie to miało stanowić symulację reakcji jaka zachodzi w reaktorze urządzenia ORTWED podczas

procesu zestalania. Na przygotowanych próbkach wykonano badania wilgotności wytworzonego produktu po 6 i 24 godzinach od wymieszania oraz badania aktywności  $\Delta t$  w HCl. Próbkę te umieszczone w słoikach stanowią wzorce do przybliżonego określenia zawartości CaO w przetworzonych osadach (rys. 2).



Rys.2. Wzorce o różnej zawartości CaO wykonane w Laboratorium IBDiM dla porównywania z produktem przetwarzania osadów uzyskiwanym w Płocku  
Fig.2. Reference samples with various CaO content obtained at IBDiM for a comparison with sludge processed in Płock

Wyniki badań przetworzonego osadu uzyskanego w IBDiM, jak również osadu przetworzonego w wytwórni w Płocku, pobranego w różnych okresach, przedstawiono w tablicach 1 i 2.

Jak widać na rysunku 2 w początkowej fazie - lipiec/sierpień 2002 r. przetworzony osad zawierał 15÷20% CaO, później w okresie wrzesień/listopad 2002 r. 25÷30%. Produkt ciemny stanowił granulát o znacznej wilgotności, produkt jasny był w postaci proszku i o mniejszej wilgotności. Z analizy danych przedstawionych w tablicy 1 wynika, że parametry przetworzonego osadu uzyskiwanego w skali technicznej nie odpowiadały przyjętym założeniom wilgotnościowym; wilgotność utrzymywała się w granicach od 31÷38% praktycznie wykluczając zastosowanie do stabilizacji gruntów. Wynika z tego wniosek, że dodatek 30% wapna palonego do osadów był za mały. Stan uwodnienia osadów jest bardzo zmienny; osady charakteryzują się zawartością suchej masy od 7÷70%, co wymaga zmiennej ilości dodatków wapna przy zapewnieniu precyzyjnej kontroli jego dozowania. Rysunki 3 i 4 przedstawiają uwodnione osady porafineryjne w postaci płynnej przed zestaleniem i po zestaleniu w instalacji ORTWED, składowane na hałdzie w postaci granulatu lub wilgotnego proszku.

Na podstawie wyników przedstawionych w tablicy 1 i na rysunku 2 można zauważyć, że zestalenie osadu porafineryjnego do postaci granulatu bądź proszku uzyskuje się

już przy małych dodatkach wapna - od 15% wagowych. Jednak do zastosowania jako spoiwo w drogownictwie przetworzony osad powinien posiadać określoną aktywność  $\Delta t$  oraz niską wilgotność, którą wstępnie założono poniżej 5%. Aktywność wiąże się z zawartością wolnego CaO w spoiwie.



Rys.3. Zaolejone osady przed przetworzeniem – faza płynna  
Fig.3. Oily deposits before processing - liquid phase



Rys.4. Zaolejone osady po przetworzeniu - faza stała  
Fig.4. Oily deposits after processing - solid phase

Wg PN-S-96035:1997 [4] przyjmuje się, że materiał wykazuje zadowalającą aktywność, gdy  $\Delta t > 30^{\circ}\text{C}$ . Norma ta dotyczy badań popiołów lotnych i opisana w niej metoda badania aktywności powszechnie stosowana jest w drogownictwie do badania aktywności popiołów lotnych. Badanie polega na pomiarze przyrostu temperatury  $\Delta t$  w  $^{\circ}\text{C}$  próbki spoiwa o masie 30 g po dodaniu do niej 24 ml 10% kwasu solnego. Przybliżoną zawartość wolnego CaO dla substancji o wilgotności  $\leq 5\%$  i związaną z tym aktywność można wyznaczyć z poniższych zależności:

- substancja nieaktywna lub bardzo mało aktywna o zawartości CaO  $< 3,5\%$  –  $\Delta t > 27^{\circ}\text{C}$ ,
- substancja mało aktywna o zawartości  $3,5\% \leq \text{CaO} < 7\%$  –  $\Delta t = 28 \div 40^{\circ}\text{C}$ ,
- substancja aktywna o zawartości  $7\% \leq \text{CaO} < 14\%$  –  $\Delta t = 40 \div 50^{\circ}\text{C}$ ,
- substancja bardzo aktywna o zawartości CaO  $\geq 14\%$  –  $\Delta t > 50^{\circ}\text{C}$ .

Badania laboratoryjne wykazały, że w zależności od ilości dodatku wapna palonego do osadów uzyskuje się pewne niewielkie zróżnicowanie przetworzonych osadów pod względem aktywności; są:

- nieaktywne przy stosowaniu wapna w ilościach do 25%,
- mało aktywne lub aktywne przy stosowaniu wapna w ilościach od 25÷40%.



Tablica 1. Wyniki badań osadów zaolejonych z Płocka zestalonych różnymi dodatkami wapna palonego mielonego  
 Table 1. Results of tests of oily deposits from Płock solidified with various quicklime additives

Osady zaolejone [%]	Wapno palone mielone [%]	Wilgotność [%]		Aktywność $\Delta t$ °C	Barwa	Konsystencja
		po 6 godz. od wymieszania	po 24 godz. od wymieszania			
100	0	104,9	-	-	czarna	półpłynna
85	15	48,3	35,5	23	c. brązowa	granulat
80	20	35,2	24,2	25	brązowa	granulat
75	25	20,8	14,9	28	c. szara	proszek
70	30	16,3	9,9	32	szara	proszek
65	35	12,2	7,4	34	szara	proszek
60	40	10,6	4,5	37	j. szara	proszek
0	100	3,4	-	-	biała	proszek

Tablica 2. Wyniki badań przetworzonych osadów wytworzonych w różnych okresach  
 Table 2. Results of tests performed on processed oil sludge at various production periods

Rodzaj i miejsce przetworzenia	Wilgotność w [%]	Zawartość wody [%]	Aktywność $\Delta t$ [°C]	Uwagi
Osady zaolejone zestalone z wapnem palonym mielonym w Strzelcach Opolskich - sierpień 2000 r.	5,0	4,8	33	Przechowywane w beczkach
Osady zaolejone zestalone z wapnem palonym mielonym w IBDiM - lipiec 2002 r.	2,8	2,7	35	Przechowywane w laboratorium
Osady przetworzone w instalacji w Płocku 02.08.02	36,65	26,82	20	Składowane na wolnym powietrzu, bez zadaszzenia
Osady przetworzone w instalacji w Płocku 20.08.02	30,85	23,58	21	Składowane na wolnym powietrzu, bez zadaszzenia
Osady przetworzone w instalacji w Płocku 8-9.09.02	38,28	27,68	23	Składowane na wolnym powietrzu, bez zadaszzenia

Wynika z tego, że praktycznie można uzyskać przetworzony osad aktywny przy stosowaniu wapna palonego w ilościach 35÷40% wagowych. Przy takich dodatkach wapna wilgotność zestalonego osadu wynosi od 4,5% do 10%, co wyklucza pneumatyczny transport takiego spoiwa ze względu na możliwość zapychania się instalacji. Pomiar wilgotności przetworzonych osadów przeprowadzone po 6 i po 24 godzinach od przetworzenia wykazują, że w tym krótkim czasie następuje znaczny spadek wilgotności.

Dodatkowo przeprowadzono badania zawartości wolnego CaO oraz innych związków wapnia CaCO<sub>3</sub> i Ca(OH)<sub>2</sub> metodą analityczną wg [5] oraz metodą dyfrakcji rentgenowskiej. Celem badań było ustalenie zmian składu chemicznego przetworzonego osadu w czasie oraz określenie jego aktywności. Badania prowadzono po upływie 7, 28, 42 i 90 dni od wytworzenia. Próbki przetworzonego osadu były sezonowane w warunkach naturalnych, zamknięte szczelnie w worku bez dostępu powietrza oraz w laboratorium z dostępem powietrza (tabl. 2). Wyniki badań zawartości związków wapnia przedstawiono w tabelicy 3 i na rysunku 5.

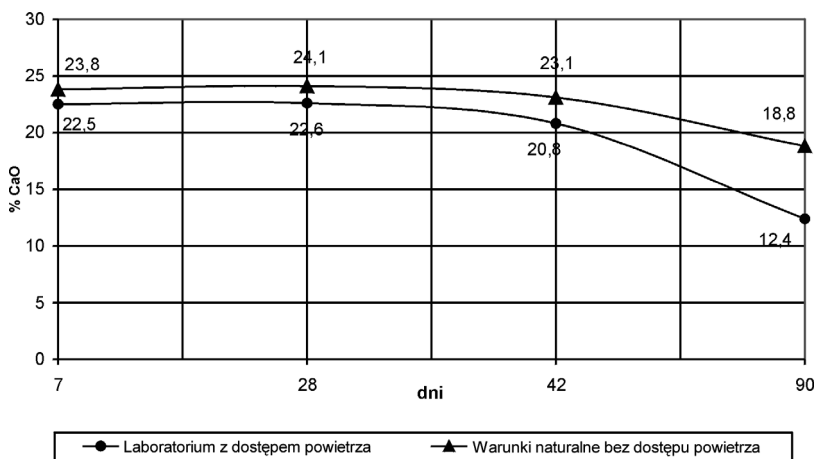
Tablica 3. Zestawienie intensywności wybranych refleksów dyfrakcyjnych  
Table 3. Intensity of selected diffraction reflexes

Miejsce przechowywania próbki	Czas od wyprodukowania	Intensywność refleksów			
		Ca(OH) <sub>2</sub>		CaO	CaCO <sub>3</sub>
		4,90 [Å]	2,62 [Å]	3,33 [Å]	3,04 [Å]
Laboratorium	7 dni	166	197	211	155
	90 dni	128	168	195	208
Warunki naturalne	7 dni	180	216	207	163
	90 dni	123	143	141	180
Zawady	6 miesięcy	205	268	105	141

Z analizy wyników przedstawionych na rysunku 5 wynika, że nie występują istotne zmiany w zawartości wolnego CaO w czasie do 42 dni. Po tym czasie następuje załamanie się krzywych, odzwierciedlających znaczne zmniejszenie się zawartości CaO, by po 90 dniach osiągnąć ok. 50÷70% jego początkowej zawartości. Dostęp powietrza w przypadku próbek przechowywanych w laboratorium wpływa na zmniejszenie się zawartości CaO, natomiast przetworzony osad przechowywany w szczelnych workach charakteryzuje się mniejszymi spadkami zawartości CaO. Jednak w przypadku obu próbek sezonowanych w różnych warunkach okres 42 dni jest granicznym, po którym następuje gwałtowny spadek zawartości CaO.

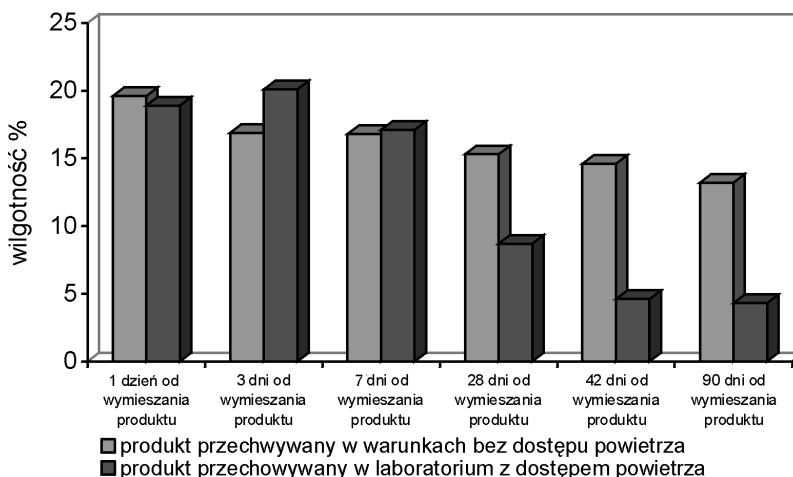
Powyższe spostrzeżenia potwierdzają badania dyfrakcji rentgenowskiej (tabl. 3). Obserwuje się tu zjawisko karbonizacji wapna i przechodzenie tlenku wapnia CaO w fazę węglanu wapnia Ca(CO)<sub>3</sub>. Z upływem czasu następuje spadek zawartości CaO oraz Ca(OH)<sub>2</sub>, co tłumaczy zmniejszenie się aktywności i sprawności działania przetworzonych osadów jako spoiwa.





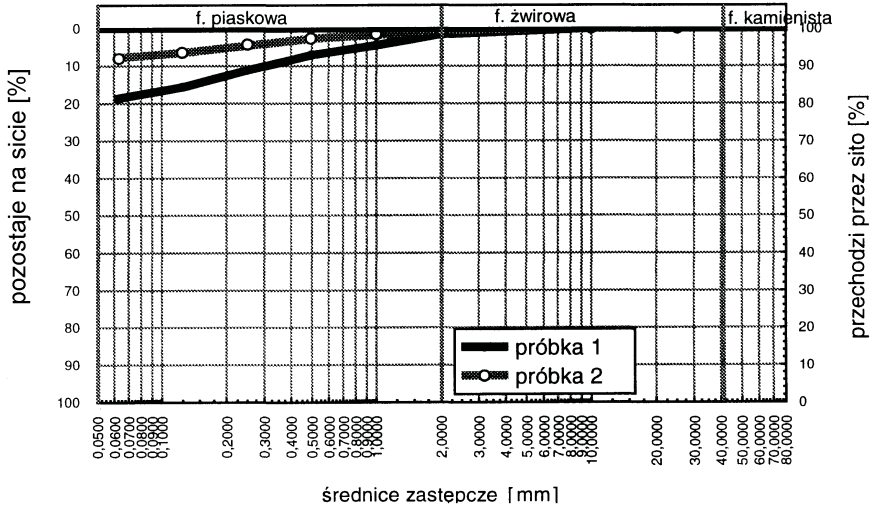
Rys.5. Zawartość wolnego CaO w przetworzonych osadach w funkcji czasu od przetworzenia i pielęgnacji w różnych warunkach  
 Fig.5. The content of free CaO in the processed sludge in various periods from its production and curing under different conditions

Wilgotność przetworzonych osadów zmniejsza się z upływem czasu. Przy wyjściowej wilgotności ok. 20%, po 90 dniach następuje jej spadek do 14% w przypadku próbki przechowywanej w szczelnie zamkniętym worku, natomiast próbka przechowywana w laboratorium na wolnym powietrzu wykazuje większy spadek wilgotności do ok. 4% (rys. 6). Wilgotność po 42 dniach sezonowania przetworzonych osadów ulega niewielkim zmianom.



Rys.6. Zależność wilgotności przetworzonych osadów od czasu i warunków przechowywania  
 Fig.6. The influence of storage time and storage conditions on humidity of processed sludge

Przykładową charakterystykę różnych próbek produktu pobranego z tymczasowej instalacji ORTWED przedstawiono w tablicy 4 i na rysunku 7.



Rys.7. Wykres uziarnienia przetworzonego osadu otrzymanego w różnych okresach  
Fig.7. Grain distribution chart obtained in various periods

Osady przetworzone do postaci stałej pod względem uziarnienia wg klasyfikacji geotechnicznej [6] odpowiadają pyłom. Skład ziarnowy zależy od ilości zastosowanego wapna palonego do zestalenia osadu. Im większa ilość wapna, tym przetworzony osad jest drobniejszy. Przy małych dodatkach wapna uzyskuje się granulaty, natomiast przy większych – proszek. Proszek ma zabarwienie szaro brunatne i charakteryzuje się zapachem typowym dla węglowodorów. Zaobserwowane zmiany uziarnienia na przedstawionym wykresie nie należą do dużych. Zawartość frakcji drobnych przechodzących przez sito 0,075 mm waha się w granicach od 82÷92%.

Przetworzony osad jest materiałem niewysadzinowym i nie pęczniejącym. Charakteryzuje się wskaźnikiem nośności bezpośrednio po ubiciu  $W_{nos}=12\div13\%$ , który utrzymuje się na tym poziomie podczas 28 dniowej pielęgnacji, w tym 7 dni moczenia. Bezpośrednio po ubiciu próbki przetworzonego osadu charakteryzują się zbliżoną nośnością niezależnie od zawartości wapna.

Przetworzony osad porafineryjny charakteryzuje się gęstością w stanie zagęszczonym od 1,01 g/cm<sup>3</sup> do 1,13 g/cm<sup>3</sup>. Niższa gęstość jest charakterystyczna dla osadu zestalonego większą ilością wapna. Gęstość w stanie luźnym dla badanych odmian przetworzonego osadu porafineryjnego wynosi odpowiednio 0,737 g/cm<sup>3</sup> przy większej zawartości wapna i 0,765 g/cm<sup>3</sup> dla odmiany zawierającej mniej wapna. Pod względem aktywności materiał obu badanych próbek wg klasyfikacji zgodnej z PN-S-96035:1997 [4] był nieaktywny lub bardzo mało aktywny. Stwierdzenie to wymaga wyjaśnienia, gdyż według wzorców wykonanych w IBDiM, po porównaniu ich parametrów ustalono, że zawartość wapnia w badanym produkcie wynosi 15÷25 %.

Tablica 4. Zestawienie cech fizyczno – mechanicznych próbek przetworzonego osadu pobranego z instalacji ORTWED w różnych okresach produkcji (ciemny i jasny)

Table 4. Physical and mechanical properties of specimens taken from the ORTWED system at various production periods (dark and light)

Badana cecha	Produkt pobrany z instalacji	
	Próbka 1	Próbka 2
Wilgotność optymalna $w_{opt}$ [%]	20,8	41,8
Gęstość objętościowa w stanie luźnym $[\text{g}/\text{cm}^3]$	0,765	0,737
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego $\rho_{ds}$ $[\text{g}/\text{cm}^3]$	1,129	1,012
Wilgotność próbek $w$ [%]	38,28	30,48
Zawartość wody $w$ [%]	27,68	23,36
Aktywność produktu $\Delta t$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	23	24
Analiza sitowa (na mokro) pozostaje na sicie # w % masy		
4,00 mm	0,00	0,00
2,00 mm	1,60	0,52
1,00 mm	2,86	1,26
0,50 mm	2,62	0,94
0,25 mm	4,13	1,82
0,125 mm	4,45	1,93
0,075 mm	2,93	1,33
Przechodzi przez sito # 0,075 mm	81,41	92,20
Wskaźnik nośności $W_{noś}$ (CBR)		
bezpośrednio po zagęszczeniu	12/12	13/12
po 7 dniach moczenia w wodzie	11/10	10/9
po 28 dniach w tym 7 dni moczenia w wodzie	13/14	16/15
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]		
$R_7$	0,4	0,6
$R_{14}^p$	0,35	0,58
$R_{28}^m$	0,23	0,49
Oznaczenia: $R_7$ - wytrzymałość na ściskanie po 7 dniach i całkowitym nasyceniu próbek wodą, $R_{14}^p$ - wytrzymałość na ściskanie po 14 dniach i całkowitym nasyceniu próbek wodą, – wytrzymałość na ściskanie po 14 dniach i całkowitym nasyceniu próbek wodą $R_{28}^m$ - wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach ( w tym 14 dni nasycania próbek wodą)		

Próbki charakteryzują się dużą wilgotnością naturalną o wartości  $w=30\div 38\%$ . Mimo zestalenia osadu do postaci proszku utrzymuje się wilgotność na dość wysokim poziomie. Wynika z tego wniosek, że przetworzony osad porafineryjny musi dojrzewać na powietrzu pod wiatą w celu odparowania nadmiaru wody. Przetworzony osad wykazuje cechy wiążące, przejawiające się niewielką wytrzymałością na ściskanie osiowe, która jest uzależniona od zawartości związków wapna ( $\text{CaO}$  i  $\text{Ca(OH)}_2$ ) i wzrasta z upływem czasu.

Z przeprowadzonych badań wynika wniosek, że mimo stosowania dużych dodatków wapna palonego do zestalenia osadu, jego wilgotność utrzymuje się na poziomie uniemożliwiającym transport cementowozami, co ogranicza stosowanie na większą skalę. Do celów drogowych w celu osuszenia gruntu i jego stabilizacji wymagać należy jak najmniejszej wilgotności spoiwa i można przyjąć że powinna ona wynosić max. 5%. Dlatego też po procesie zestalenia w reaktorze przetworzony osad wymaga odparowania nadmiaru wilgoci, bądź dłuższego przebywania w reaktorze i przy zawartości  $\text{CaO}$  w stosunku do masy uwodnionego osadu  $> 35\%$ .

### 3. ZAKRES BADAŃ GRUNTÓW NA ODCINKACH DOŚWIADCZALNYCH

Wymagania przedstawione w [7, 8] nakładają obowiązek uzyskania wysokich parametrów technicznych dla podłoża drogowego (wtórny moduł odkształcenia  $E_2=100\div 120$  MPa, wskaźnik zagęszczenia  $I_s=1,00\div 1,03$  – podłoże *GI*) jak również dla niższych warstw budowli ziemnych ( $E_2=30\div 100$  MPa i  $I_s=0,95\div 1,00$ ) w zależności od głębokości zalegania warstwy i obciążenia ruchem. Parametry te często są nieosiągalne w gruntach naturalnych (miejscowych), zwłaszcza przewilgoconych gruntach spoiowych, które bez ulepszenia są nieprzydatne do robót ziemnych. Grunty te, to między innymi przewilgocone gliny, pyły, ropy, piaski pylaste i gliniaste, które zalicza się do gruntów “trudno urabialnych”, sprawiających kłopoty w robotach ziemnych. Należą one do grupy gruntów wysadzinowych i bardzo wysadzinowych, o ograniczonej przydatności do robót ziemnych wg [7] poniżej strefy przemarzania i nieprzydatnych w strefie oddziaływania wody i mrozu. Zastrzeżenia przedstawione w [7] dotyczą odpowiedniego umiejscowienia oraz zabudowy tych gruntów w budowlach ziemnych oraz nakładają obowiązek ulepszenia spoiwami w strefie przemarzania. Poprawa właściwości gruntów w wyniku zastosowania odpowiednio dobranego spoiwa zwiększa szanse ich wykorzystania zamiast wymiany.

W praktyce wybór odpowiedniego rodzaju i wielkości dodatku spoiwa uzależnia się od:

- rodzaju, stanu i wilgotności gruntu,
- koniecznego lub pożądanego efektu wzmocnienia (zwiększenie nośności i zmniejszenie wrażliwości na wpływy atmosferyczne).

Skuteczność ulepszenia i wybór odpowiednich dodatków spoiwa ustala się na podstawie badań laboratoryjnych gruntów i mieszanek, uzyskania założonych parametrów technicznych (wskaźnik nośności  $w_{noś}$ , wytrzymałość na ściskanie  $R$ ) na próbkach poddanych różnym warunkom pielęgnacji. Przydatność i warunki realizacji wybranego rozwiązania powinny być sprawdzone praktycznie na poletku próbnym.

Przedmiotem badań przedstawionych w tym rozdziale było ustalenie wpływu przetworzonych osadów w procesie ulepszenia mało nośnych gruntów w robotach ziemnych (budowa nasypów i ulepszone podłoże drogowe) oraz w stabilizacji gruntów pod kątem wykorzystania w podbudowach drogowych. Badania wstępne laboratoryjne wykazały korzystny wpływ przetworzonych osadów na wzrost nośności i wytrzymałości gruntów spoistych. Wykazano, że przetworzony osad daje porównywalny efekt wzmocnienia, jak wapno hydratyzowane  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

Z uwagi na wyżej przedstawione rozważania badania rozszerzono w stosunku do etapu wstępnego o wykonanie i badania odcinków doświadczalnych z użyciem gruntów stabilizowanych przetworzonymi osadami.

Badania przebiegały dwuetapowo. W pierwszej kolejności prowadzono badania laboratoryjne pozwalające ustalić cechy gruntów w stanie naturalnym, a następnie wpływ przetworzonych osadów na grunty poddane ulepszeniu. W drugim etapie prowadzono badania polowe na odcinkach doświadczalnych, które zaprojektowano na podstawie rozpoznania terenowego i badań laboratoryjnych. Przy wyborze gruntów kierowano się tym, aby były to grunty słabe, o niskiej nośności, nieodporne na działanie wody i mrozu. Te kryteria spełniają grunty spoiste - ły, gliny, pyły i małospoiste – piaski gliniaste i pylaste, pyły piaszczyste, które zalicza się do gruntów wysadzinowych lub wątpliwych wg klasyfikacji podanej w [7].

Przeprowadzono także badania stabilizacji gruntów niespoistych przetworzonymi osadami oraz rozszerzono program o stabilizację odpadów elektrownianych. Uzyskano bardzo interesujące wyniki badań mieszanin popiołów i popioło-żużli z małymi dodatkami przetworzonych osadów, które będą przedstawione w odrębnej publikacji.

Badania wpływu przetworzonych osadów na zmianę właściwości fizyko-mechanicznych gruntów mineralnych i antropogenicznych przeprowadzono na:

- piaskach średnich,
- piaskach drobnych,
- piaskach pylastych,
- pyłach piaszczystych,
- piaskach gliniastych,
- mieszaninach popiołowo-żużlowych,
- popiołach lotnych.

W ramach projektu opracowano i wykonano konstrukcje trzech odcinków próbnych:

- nawierzchnia drogi gruntowej w miejscowości Plecka Dąbrowa,

- nawierzchnia Targowiska Miejskiego w Piasecznie przy ul. Jana Pawła II nr 59,
- nasyp badawczy z popiołów lotnych na składowisku Zawady – E. Siekierki.

## **4. STABILIZACJA GRUNTÓW SPOISTYCH I MAŁOSPOISTYCH W POWIECIE PŁOCKIM**

### **4.1. WŁAŚCIWOŚCI GRUNTÓW PRZEZNACZONYCH DO STABILIZACJI**

Badania nad przydatnością przetworzonych osadów do stabilizacji gruntów przeprowadzono na gruntach mineralnych niespoistych i małospoistych, pobranych z odcinków drogowych, gdzie planowano wykonać poligony doświadczalne. Badania przeprowadzono na następujących gruntach:

- P i a s e k ś r e d n i – z odcinka Iłów - Gilówka Górna,
- P i a s e k d r o b n y – z odcinka w miejscowości Nowy Duninów,
- P i a s e k p y l a s t y – z odcinka w miejscowości Drobin,
- P y ł p i a s z c z y s t y – z odcinka w miejscowości Plecka Dąbrowa.

Grunty po ulepszeniu różnymi dodatkami przetworzonych osadów zostały poddane badaniom nośności i wytrzymałości przy różnych warunkach pielęgnacji. Dodatkowo uformowane próbki posłużyły do określenia bezpiecznego dodatku przetworzonego osadu do gruntów pod kątem ochrony środowiska naturalnego. Badania w tym zakresie prowadził Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Budownictwa Politechniki Warszawskiej. Charakterystykę gruntów przeznaczonych do ulepszenia różnymi dodatkami przedstawiono w tablicy nr 5.

### **4.2. WYNIKI BADAŃ CECH FIZYCZNYCH GRUNTÓW ULEPSZONYCH PRZETWORZONYMI OSADAMI**

Grunty o charakterystyce przedstawionej w tablicy 5 ulepszono dodatkami przetworzonych osadów w ilościach 6÷12% masowych. W tej części badań określono wpływ przetworzonych osadów na nośność gruntów w różnych warunkach pielęgnacji, jak również na zmianę parametrów informujących o stopniu wysadzinowości czyli wskaźnika  $WP$  [9] i  $H_{kb}$  [10]. Wpływ przetworzonych osadów na zmianę parametrów geotechnicznych gruntów stabilizowanych przetworzonymi osadami przedstawiono w tablicy 6.



Tablica 5. Właściwości gruntów użytych do badań  
Table 5. Properties of tested soils

Badana cecha	Rodzaj gruntu			
	Piasek średni	Piasek drobny	Piasek pylasty	Pył piaszczysty
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego $\rho_{ds}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	1,710	1,738	1,812	1,904
Wilgotność optymalna $w_{opt}$ [%]	11,50	10,90	12,40	11,50
Porowatość $n$	0,35	0,34	0,32	0,28
Wskaźnik nośności $W_{nos}$ (CBR) w [%] po 4 dobach z obciążeniem	32/18	29/18	10/16	16/14
Pęcznienie liniowe "p" [%]	0,0	0,0	0,0	0,09
Wskaźnik piaszkowy $WP$ [%]	70	75	56	19
Kapilarność bierna $H_{KB}$ [cm]	30	30	30	160
Odczyn $pH$	8	7	8	7
Analiza sitowa				
Pozostaje na sicie w %				
10 mm	0,59	0,0	0,0	0,0
2 mm	8,51	0,34	0,68	3,21
1 mm	11,74	0,92	1,93	6,93
1,5 mm	17,32	5,50	7,45	17,19
0,25 mm	57,68	50,83	34,57	41,29
0,125 mm	87,4	83,62	70,69	55,29
0,075 mm	94,58	95,63	85,38	68,37
Poniżej 0,075 mm	5,42	4,37	14,62	31,63

### 4.3. WYNIKI BADAŃ WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCISKANIE GRUNTÓW ULEPSZONYCH

W celu określenia właściwości wiążących przetworzonych osadów jako spoiwa wykonano badania wytrzymałości na ściskanie oraz badania mrozoodporności. Są to podstawowe parametry dla podbudów drogowych z gruntów stabilizowanych spoiwami takimi jak: cement, wapno, aktywny popiół [11-13].

Próbki o wymiarach  $\phi=5\text{cm}$  i  $h=8\text{cm}$  zagęszczono normalną energią według [14]. Próbki zostały poddane pielęgnacji zgodnie z [11]. Wyniki badań przedstawiono w tablicy 7.

Tablica 6. Wyniki badań cech fizycznych gruntów ulepszonych przetworzonymi osadami

Table 6. Physical properties of soils treated with the processed oil sludge

Rodzaj gruntu	Dodatek przetworzonych osadów [%]	Wskaźnik nośności $W_{nos}$ [%]			Pęcznienie $P$ [%]	Wskaźnik piaskowy $WP$ [%]	Kapilarność bierna $H_{kb}$ [cm]
		bezpośrednio	po 4 dobach	po 7 dobach			
Piasek średni	0	35/24 <sup>*)</sup>	32/18		0,0	70	30
	6	27/26	24/25	28/29	0,0	67	-
	10	31/30	30/30	32/33	0,0	63	-
	12	34/35	33/34	36/38	0,0	62	-
Piasek drobny	0	30/19	29/18	-	0,0	75	30
	6	36/28	50/39	55/37	0,0	65	-
Piasek pylasty	0	13/20	10/16		0,0	56	30
	6	36/21	51/36	56/38	0,0	48	-
Pył piaszczysty	0	25/26	16/14		0,09	19	160
	6	26/28	19/20	25/27	0,0	33	-
	8	30/32	28/30	29/31	0,0	36	-

<sup>\*)</sup>  $W_{nos}$  35/24 oznacza  $W_{nos}$  =35% przy penetracji tłka 2,5cm i  $W_{nos}$  =24% przy penetracji 5,0cm

Tablica 7. Zestawienie wyników badań wytrzymałości na ściskanie gruntów ulepszonych różnymi dodatkami przetworzonych osadów

Table 7. Results of compression tests of soil treated with processed oil sludge

Rodzaj gruntu	Dodatek przetworzonych osadów [%]	$R_7$ [MPa]	$R_{28}$ [MPa]	$R_{100}$ [MPa]
Piasek średni	6	0	0,075	0,10
	10	0,15	0,175	0,15
	12	0,22	0,275	0,25
Pył piaszczysty	4	0,20	0,10	0,18
	6	0,25	0,15	0,25
	8	0,35	0,20	0,21

Kompozycje gruntu ulepszonego różnymi dodatkami przetworzonych osadów poddano dodatkowo stabilizacji emulsją asfaltową. Cel zastosowania emulsji był dwójaki. Cel techniczny - zwiększenie wytrzymałości i cel ekologiczny - zmniejszenie wymywalności substancji szkodliwych do środowiska. W badaniach zastosowano emulsję asfaltową kationową wolno rozpadową K3-60%, o zawartości bitumu 60%. Z uwagi na wrażliwość emulsji na podwyższone temperatury badania prowadzono w różnych temperaturach. Jest to istotne zwłaszcza, gdy warstwa zawierająca asfalt znajduje się w strefie oddziaływania wysokich temperatur w okresie letnim. Wyniki badań przedstawiono w tabelicy 8.

Tablica 8. Wyniki badań wytrzymałościowych piasku średniego pobranego z drogi Iłów – Gilówka Górna ulepszony dodatkiem przetworzonego osadu i emulsji K3 – 60  
Table 8. Results of strength tests of medium-grained sand specimens from the Iłów – Gilówka Górna road, treated with processed oil sludge and K3 - 60 emulsion

Dodatek przetworzonego osadu (%)	Dodatek emulsji K3 – 60	Wytrzymałość na ściskanie przy różnej pielęgnacji i różnych temperaturach [MPa]									
		$R_7$			$R_{14}^m$			$R_{28}^m$			$R_{100}^m$
		temperatura			temperatura			temperatura			temperatura
		20°C	40°C	60°C	20°C	40°C	60°C	20°C	40°C	60°C	20°C
6	5	0,15	0,10	0,08	0,20	0,15	0,12	0,25	0,20	0,15	0,10
10	5	0,20	0,15	0,10	0,25	0,20	0,15	0,30	0,25	0,20	0,15
12	5	0,25	0,20	0,15	0,30	0,25	0,20	0,35	0,30	0,25	0,25

$R^m$  – próbki przechowywane (suszone) w warunkach powietrzno – suchych aż do osiągnięcia stałej masy

#### 4.4. OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ LABORATORYJNYCH

Jak przedstawiono w tabelicy 5 grunty, do badań użyto gruntów niespoistych i w jednym przypadku gruntu mało spoistego. Są to grunty mineralne o gęstości objętościowej szkieletu gruntowego  $\rho_{ds} = 1,710 \div 1,904 \text{ g/cm}^3$ . Przyjmując klasyfikację wg [6], grunty niespoiste (piaski średnie, drobne i pylaste) charakteryzujące się wskaźnikiem piaskowym  $WP=56 \div 75 > 35$  i kapilarnością bierną  $H_{kB} = 30 \text{ cm}$  zaliczyć należy do gruntów niewysadzinowych – odpornych na działanie wody i mrozu. Pył piaszczysty – grunt mało spoisty o  $WP = 16$  i  $H_{kB} = 160 \text{ cm}$  klasyfikowany jest jako grunt wątpliwy – o ograniczonej odporności na działanie tych czynników. Przeprowadzone badania wskaźnika nośności  $W_{nos}$  potwierdzają powyższe rozważania. Grunty niespoiste charakteryzują się po nasyceniu wodą wskaźnikiem  $W_{nos} \sim 30\%$ , natomiast pył piaszczysty niższą nośnością o  $W_{nos} \sim 16\%$ . Pod względem odczynu  $pH$  wszystkie badane grunty klasyfikują się do gruntów obojętnych lub lekko alkalicznych  $pH = 7 \div 8$ .

Badania mieszanek piasków średnich z różnymi dodatkami przetworzonego osadu nie wykazały istotnej poprawy nośności w piaskach średnich, niezależnie od warunków i

czasu pielęgnacji. Nośność piasku średniego ulepszanego 6%, 10% i 12% dodatkiem przetworzonego osadu jest porównywalna z nośnością wyjściową piasku niestabilizowanego. Nawet po 7 dobowej pielęgnacji próbek nie zaobserwowano przyrostu nośności. W tym przypadku przetworzony osad nie stanowi stabilizatora dla tego rodzaju gruntów. Podobna sytuacja występuje także w piaskach drobnych, mimo, że po 4 dobach nastąpił wzrost wskaźnika nośności to w stosunku do piasku nieulepszanego; nie był to wzrost istotny. Piaski średnie i drobne użyte do badań w stanie naturalnym (bez ulepszenia) poddane 4 dobowemu nasyceniu wodą nie tracą nośności, więc są to grunty nośne. Wpływ przetworzonego osadu jako stabilizatora na te grunty jest niewielki.

Piaski pyłaste i pyły piaszczyste, w odróżnieniu od gruntów opisanych powyżej, są gruntami wrażliwymi na działanie wody i tracą nośność podczas 4 dobowego nasycania wodą. Poddane stabilizacji przetworzonymi osadami w ilości 6÷8%, już nie wykazują spadku nośności, a nawet jej wzrost. Wzrost nośności w tym przypadku jest znaczny, a wskaźnik  $W_{noś}$  jest od 2 do 5 razy większy niż wskaźnik  $W_{noś}$  gruntów nieulepszonych po nasyceniu wodą. Normowe 4 dobowe nasycanie wodą zastosowano zgodnie z PN-S-02205:1998 w której podaje się metodykę badania wskaźnika nośności. W wynikach badań dostrzec można charakterystyczną cechę. Dodatek przetworzonych osadów do gruntów niespoistych powoduje zmniejszenie się wartości wskaźnika piaskowego  $WP$ , natomiast w pyłach piaszczystych nastąpiło odwrotne zjawisko – wzrost wartości  $WP$ . W przypadku gruntów wysadzinowych o małej wartości  $W_{noś} < 25$  jest to zjawisko bardzo pozytywne, które powoduje, że grunty stają się mniej wysadzinowe czyli bardziej odporne na działanie wody i mrozu. Pył piaszczysty o wskaźniku  $WP = 19$  poddany stabilizacji przetworzonym osadem uzyskał wskaźnik  $WP = 33÷36$ . Oznacza to zmianę klasyfikacji z gruntu wysadzinowego do gruntu wątpliwego lub niewysadzinowego.

Badania wytrzymałości na ściskanie gruntów ulepszonych przetworzonymi osadami wykazują niewielkie wartości zarówno w piaskach średnich jak i w pyłach piaszczystych. Uzyskiwane wartości nie spełniają wymagań stawianym podbudowom drogowym. Badania wykazały, że wytrzymałość uzależniona jest od dodatku przetworzonych osadów do gruntu: czym większy jest dodatek, tym większa wytrzymałość. Zauważyć można, że ten sam dodatek przetworzonych osadów do gruntów wywołuje lepsze wiązanie w pyłach niż w piaskach, podobnie jak w badaniach wskaźnika nośności.

Próby stabilizacji emulsją asfaltową piasków średnich ulepszonych różnymi dodatkami przetworzonych osadów wykazały niewielkie wytrzymałości na ściskanie, wykluczające zastosowanie takich kompozycji w podbudowach drogowych.

Powyższe rozważania pozwalają na ustalenie pewnej prawidłowości. Stabilizacja gruntów niespoistych (piasków średnich i drobnych) przetworzonymi osadami nie przynosi poprawy parametrów geotechnicznych, ale im grunty są drobniejsze, tym uzyskiwane efekty wzmocnienia są wyraźniejsze. W celu praktycznego sprawdzenia skuteczności wzmocniania gruntów przetworzonymi osadami wybrano do realizacji odcinek doświadczalny o podłożu z pyłów piaszczystych zlokalizowany w miejscowości Plecka Dąbrowa.

#### 4.5. WYNIKI BADAŃ NA ODCINKU DOŚWIADCZALNYM

Wyniki badań laboratoryjnych wykazały pozytywny wpływ przetworzonych osadów na zmianę właściwości gruntów pylastych. Dało to podstawę do sprawdzenia w skali naturalnej zachowania się podbudowy z gruntu stabilizowanego przetworzonym osadem pod względem technicznym i ekologicznym. W tym celu w październiku 2002 r. wykonano odcinek próbny drogi gruntowej o podłożu z pyłów piaszczystych w gospodarstwie rolnym w miejscowości Plecka Dąbrowa. W podłożu drogi zalegają w górnej warstwie do 1÷1,5 m pyły piaszczyste i głębiej do głębokości 2,5 m p.p.t gliny piaszczyste wg [15]. Wody gruntowej na badanym odcinku nie stwierdzono. Droga gruntowa po opadach atmosferycznych traciła nośność uniemożliwiając jej przejezdność. Na podstawie badań laboratoryjnych zaprojektowano podbudowę z gruntu podłoża stabilizowanego 8% dodatkiem przetworzonych osadów w stosunku do masy szkieletu gruntowego z warstwą jezdnią z pospółki. Przekrój wykonanej konstrukcji nawierzchni przedstawiono na rysunku 8.

<b>Mieszanka żwirowo-piaskowa - gr. 10 cm</b>	-10-
<b>Wzmocnienie istniejącej nawierzchni gruntowej przetworzonymi osadami - gr. 20 cm</b>	-20-

Rys.8. Przekrój konstrukcji nawierzchni odcinka doświadczalnego  
Fig.8. Cross section of the experimental pavement

Przeznaczony do badań odcinek drogi jest częścią drogi dojazdowej do pól uprawnych. Otoczenie drogi z jednej strony stanowią pola uprawne z drugiej drzewostan przy ogrodzeniu posesji. Widok wykonanego odcinka przedstawiono na rysunku 9.

Odcinek zaprojektowano w technologii mieszania gruntu na miejscu. Do mieszania gruntu zastosowano sprzęt rolniczy, który umożliwił mieszania gruntu na założoną grubość. Przetworzony osad dostarczony przyczepą ciągnikową został rozłożony ręcznie. Po wymieszeniu gruntu z przetworzonym osadem warstwę gruntu zagęszczono walcem drogowym. Wykonany odcinek stanowić miał poligon do badań nośności i wpływu na środowisko naturalne w 2 letnim okresie obserwacji.

Przed rozpoczęciem robót zostały założone piezometry w celu zbadania “tła” – stanu ekologicznego wód gruntowych. Badania próbek wody gruntowej miały na celu określenie wpływu przetworzonych osadów na zanieczyszczenie wód w zakresie wskaźników istotnych przy odprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi zgodnie z [16].



Rys.9. Widok odcinka po wykonaniu, przed przykryciem pospółką (październik 2002 r.)

Fig.9. View of completed section before covering with sand-gravel (October 2002)

Badania w tym zakresie były prowadzone przez Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Budownictwa Politechniki Warszawskiej

W czasie budowy odcinka były prowadzone badania stopnia wymieszania, zagęszczenia warstwy i nośności. Do badań nośności zastosowano metody dynamiczne - płytę dynamiczną [17-19] i tester Clegga (impact soil tester) wg [20]. Wyniki przeprowadzonych badań przedstawiono w tablicy 9.

Badania przedstawione w tablicach 9 i 10 przeprowadzone zostały bezpośrednio po wykonaniu podbudowy (przed jej związaniem) i będą kontynuowane przez okres 2 lat w różnych warunkach pogodowych. Wykonana nawierzchnia znajduje się pod ruchem ciężkich maszyn i przyczep rolniczych.



Tablica 9. Zestawienie wyników badań wskaźnika nośności  $W_{noś}$  i dynamicznego modułu odkształcenia  $E_{vd}$  warstwy gruntu stabilizowanej 8% dodatkiem przetworzonych osadów - badania wykonane w październiku 2002 r.  
 Table 9. Results of the  $W_{noś}$  load capacity ratio and the  $E_{vd}$  dynamic modulus of deformation of a soil layer stabilised by adding 8% of the processed sludge - test performed in October 2002

Punkt badawczy	Płyta dynamiczna		Tester Clegga	
	Osiadanie s [mm]	Dynamiczny moduł odkształcenia $E_{vd}$ [MPa]	$W_{noś}$ [%]	
			W punkcie bad.	Wartość średnia
1	1,12	20,03	6,93	21,80
			36,67	
2	0,94	24,72	5,16	7,07
			8,99	
3	1,23	18,29	5,16	7,07
			8,99	
4	0,66	33,93	14,01	10,47
			6,93	
5	1,06	21,22	11,35	10,17
			8,99	
6	0,95	23,62	14,18	11,58
			8,99	
7	1,56	14,55	14,01	15,49
			16,98	
8	0,78	28,84	16,98	18,62
			20,27	
9	1,80	12,69	20,27	14,63
			8,99	
10	0,92	24,29	6,98	18,62
			20,27	
11	0,80	28,42	6,93	10,47
			14,01	
Wartości średnie na badanym odcinku				
Osiadanie				
	1,07 mm			
Moduł dynamiczny				
		22,78 MPa		
$W_{noś}$ (CBR)				
				12,99 %

Tablica 10. Zestawienie badań wskaźnika zagęszczenia  $I_s$  warstwy podbudowy  
 Table 10. Results of  $I_s$  compaction ratio of the subbase layer

Badana cecha	Punkt-1	Punkt-2
Wilgotność pobranej próbki	19,30 %	16,61 %
Gęstość objętościowa szkieletu gruntowego pobranej próbki <sup>*)</sup> $\rho_d$ [g / cm <sup>3</sup> ]	1,544	1,593
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego $\rho_{ds}$ [g / cm <sup>3</sup> ]	1,625	1,625
Wilgotność optymalna $w_{opt}$ %	16,5	16,5
Wskaźnik zagęszczenia $I_s$	0,95	0,98
<sup>*)</sup> próbka pobrana cylindrem wciskany o sztywnych ściankach		

## 5. STABILIZACJA GRUNTÓW PODŁOŻA NA OBSZARZE TARGOWISKA MIEJSKIEGO W PIASECZNIE

### 5.1. OPIS PODŁOŻA

Targowisko Miejskie zlokalizowane jest przy ul. Jana Pawła II nr 59 w Piasecznie. Dokumentacja techniczna oraz badania własne IBDiM [21] dotyczące stanu i rodzaju gruntów występujących na tym terenie wykazały, że podłoże pod projektowane targowisko stanowi nasyp niekontrolowany z gruntów mało spoistych i spoistych (pyły, pyły piaszczyste, piaski gliniaste, gliny piaszczyste) przemieszanych z gruzem budowlanym. W górnej warstwie podłoża bezpośrednio pod projektowaną konstrukcją nawierzchni wydzielono następujące rodzaje gruntów:

- pyły piaszczyste – na obszarze części handlowej targowiska,
- piaski gliniaste – na obszarze dróg komunikacyjnych.

Wg klasyfikacji geotechnicznej (tabl. 13) powyższe grunty zalicza się do gruntów wysadzinowych lub bardzo wysadzinowych. Wykonane wiercenia w podłożu do głębokości 2,0 m nie wykazały występowania wody gruntowej, co upoważnia do przyjęcia warunków wodnych jako dobrych. Przyjmując powyższe założenia - grunty wysadzinowe i warunki wodne dobre otrzymamy zgodnie z [8, 22] grupę nośności podłoża G3. Ponadto, podłoże charakteryzowało się niską nośnością o wartości wtórnego modułu odkształcenia  $E_2=9\div 36$  MPa oraz wskaźnikiem  $W_{nos}=4\div 8\%$ . Wyniki badań terenowych podłoża gruntowego w stanie naturalnym przedstawiono w tablicy 11.

Tablica 11. Wyniki badań terenowych nośności podłoża gruntowego w stanie naturalnym – teren targowiska miejskiego w Piasecznie  
 Table 11. Results of field tests of load capacity of soil in a natural state - the area of the municipal market square in Piaseczno

Stanowisko badawcze wg. planu	Rodzaj badania		
	$W_{nos}$ (CBR) [%] ( <i>impact soil tester</i> )	$E_1/E_2$ [MPa]	$E_{vd}$ [MPa]
Część handlowa targowiska			
1	-	2/7	3
2	-	-	-
3	-	-	-
4	0	4/15	7
5	3	9/21	9
6	5	12/36	14
7	1	4/17	8
Wartość średnia	3	6/19	8
Drogi komunikacyjne			
8	3	3/9	5
9	5	4/14	7
10	2	3/10	5
11	8	6/17	9
12	4	4/14	6
Wartość średnia	4	4 / 13	6

Rozpatrując przydatność podłoża w stanie naturalnym do posadowienia konstrukcji drogowej nawet o małym obciążeniu ruchem należy stwierdzić, że podłoże wymaga wzmocnienia. Założono zgodnie z [7], że podłoże powinno charakteryzować się minimalnym modułem  $E_2 \geq 60$  MPa lub  $W_{nos} > 10\%$ . Do wykonania drogi dojazdowej oraz placu targowego przyjęto konstrukcje nawierzchni przedstawione poniżej.

Na targowisku miejskim w Piasecznie przetworzony osad porafineryjny został użyty do wzmocnienia (ulepszenia) podłoża gruntowego. Projekt konstrukcji wg rysunku 10 został poprzedzony rozpoznawczymi badaniami terenowymi oraz laboratoryjnymi. Zaprojektowano 2 rodzaje warstw wzmacniających: z 3% zawartością przetworzonych osadów na terenie parkingu oraz z 6% zawartością na terenie drogi dojazdowej (rys. 10).

Odcinki były wykonywane w technologii mieszania na miejscu. Przetworzony osad rozłożony na gruncie mieszany był na odpowiednią głębokość przy pomocy

“mieszarko-frezarki” drogowej. W czasie budowy odcinków prowadzono badania dostosowane do specyfiki budowanego obiektu (określenie stopnia wymieszania, badania zagęszczenia, badania wskaźnika nośności  $W_{noś}$  i moduły  $E_1, E_2, E_{vd}$ ). W badaniach zastosowano nowoczesne urządzenia badawcze – impact soil tester (tester Clegg'a) – do określania wskaźnika  $W_{noś}$  (CBR) w terenie, płytę dynamiczną – do określania wskaźnika zagęszczenia  $I_s$  i modułu odkształcenia  $E_{vd}$ . Podobnie jak przy realizacji poprzedniego odcinka doświadczalnego i tym razem zostały wykonane otwory badawcze z piezometrami w celu umożliwienia badań próbek wody pod kątem oddziaływania przetworzonego osadu na środowisko. Badania w tym zakresie są realizowane przez Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Budownictwa Politechniki Warszawskiej.

Zaprogramowano 2-letni okres badawczy. Odcinki będą obserwowane i badane w różnych porach roku, co pozwoli na praktyczną ocenę zastosowanych rozwiązań.

	kostka betonowa – gr. 8 cm
	podsyпка cementowo-piaskowa – gr. 4 cm
	podbudowa z kruszywa łamanego stabilizowanego mechanicznie gr. 25 cm – drogi gr. 15 cm – plac handlowy
	warstwa mrozoochronna z pospółki – gr. 15 cm
	ulepszone podłoże gruntowe z dodatkiem produktu – gr. 25 cm 6% produktu – drogi 3% produktu – plac handlowy
	naturalne podłoże gruntowe

Rys.10. Przekrój konstrukcji nawierzchni dróg komunikacyjnych

Fig.10. Cross section of the pavement

## 5.2. WŁAŚCIWOŚCI GRUNTÓW PRZEZNACZONYCH DO STABILIZACJI

Właściwości gruntów naturalnych i po ulepszeniu dodatkiem przetworzonych osadów przedstawiono w tablicy 12.

Tablica 12. Właściwości gruntów przeznaczonych do stabilizacji  
 Table 12. Properties of soil designed for stabilisation

Lp.	Rodzaj gruntu	Dodatek produktu [%]	Wskaźnik nośności $W_{nos}$ ( <i>CBR</i> ) [%]		Wskaźnik piaskowy [%]	Kapilarność bierna [cm]	$R_7$ [MPa]	$R_{28}$ [MPa]
			bezpośrednio	po 7 dobach				
1	Pył piaszczysty	0	3/4 <sup>*)</sup>	2/2	11	190		
		2	27/30	43/42	17	125	0,05	0,05
		6	24/27	48/52	26	100	0,10	0,10
2	Piasek gliniasty	0	7/9	5/4	12	195		
		3	15/18	50/46	20	130	0,35	0,40
		6	23/25	47/43	24	95	0,40	0,50
		9	24/25	47/45	27	65	0,50	0,50

<sup>\*)</sup> pierwsza wartość oznacza  $W_{nos}$  (*CBR*) określony przy penetracji 2,5 mm, druga wartość  $W_{nos}$  (*CBR*) przy penetracji 5 mm

Grunty w stanie naturalnym charakteryzowały się niską nośnością, zwłaszcza po nasyceniu wodą. grunty modyfikowane niewielkim dodatkiem przetworzonych osadów wykazały znaczny wzrost wskaźnika nośności. W przypadku gruntów ulepszonych przetworzonym osadem obserwujemy wzrost wskaźnika  $W_{nos}$  o ok. 10 razy w stosunku do nośności gruntów nieulepszonych. Modyfikacja gruntów wpływa na zmianę także innych parametrów geotechnicznych. Chodzi o wysadzinowość gruntów. Grunty nieulepszone charakteryzują się wysoką wartością kapilarności biernej  $H_{kB} \sim 200$  cm i niską wartością wskaźnika piaskowego  $WP=11 \div 12$ . Oznacza to, że grunty należą do kategorii gruntów wysadzinowych (tabl. 13). Grunty poddane modyfikacji przetworzonym osadem zmieniają swoją charakterystykę pod tym względem i można je zakwalifikować już do innej grupy – do gruntów wątpliwych. Okazuje się, że większy dodatek przetworzonego osadu wywołuje większe zmiany w gruntach, natomiast już niewielkie dodatki powodują duże zmiany w tym zakresie. Jest to korzystna cecha, powodująca zwiększenie się odporności gruntów na działanie wody i mrozu. Bezpośrednio po ulepszeniu uzyskuje się wzrost nośności tak bardzo pożądanej w czasie przygotowywania podłoża drogowego. Ponadto istnieje możliwość wyeliminowania bądź ograniczenia kosztownej wymiany gruntów.

Tablica 13. Podział gruntów pod względem wysadzinowości wg [22]  
 Table 13. Soil classification with regard to heaving [22]

Wyszczególnienie właściwości	Grupy gruntów		
	niewysadzinowe	wątpliwe	sadzinowe
Rodzaj gruntu	rumosz niegliniasty żwir pospółka piasek gruby piasek średni piasek drobny żużel nierozpadowy	piasek pylasty zwietrzelina gliniasta rumosz gliniasty żwir gliniasty pospółka gliniasta	mało wysadzinowe: głina piaszczysta zwięzła, głina zwięzła, gлина pylasta zwięzła, ił, ił piaszczysty, ił pylasty bardzo wysadzinowe: piasek gliniasty, pył, pył piaszczyty, głina piaszczysta, gлина, głina pylasta, ił warwowy
Zawartość cząstek wg PN-88/B-04481, $\leq 0,075$ mm $\leq 0,02$ mm	<15 <3	$15 \div 30$ $3 \div 10$	>30 >10
Kapilarność bierna wg PN-60/B-04493, $H_{kb}$ , m	<1,0	$\geq 1,0$	>1,0
Wskaźnik piaskowy wg BN-64/8931-01, WP	>35	$25 \div 35$	<25

### 5.3. BADANIA NOŚNOŚCI PODŁOŻA PO ULEPSZENIU PRODUKTEM

Uzyskane wyniki badań nośności, które przeprowadzono trzema metodami wykazały, że podłoże uległo znacznemu wzmocnieniu po ulepszeniu produktem (tabl. 14). Uzyskano założony moduł odkształcenia  $E_2 > 60$  MPa i  $W_{nos} > 10\%$ . Analizując wyniki tych badań daje się zauważyć, że nie ma istotnego wpływu wielkość dodatku przetworzonego osadu do gruntu. Już małe modyfikacje 3% dodatkiem przetworzonego osadu wpływają znacząco na poprawę nośności i w miarę zwiększania dodatku produktu ten wzrost jest praktycznie niewielki. Potwierdza się tu zależność jaką uzyskano w badaniach laboratoryjnych  $W_{nos}$ .



Tablica 14. Wyniki badań nośności podłoża po ulepszeniu przetworzonymi osadami  
 Table 14. Results of load capacity tests on soil after stabilisation with the processed sludge

Stanowisko badawcze	Rodzaj badania		
	$W_{noś}(CBR)$ [%]	$E_1 / E_2$ [MPa]	$E_{vd}$ [MPa]
Część handlowa targowiska (3% przetworzonego osadu)			
1	22	26/59	27
2	19	34/72	34
3	21	32/65	30
4	27	25/56	26
5	29	34/75	38
6	33	28/61	27
7	26	30/62	28
Wartość średnia	25	30/64	30
Drogi komunikacyjne (6% przetworzonego osadu)			
8	37	38/82	39
9	30	28/63	32
10	26	28/58	27
11	28	32/68	31
12	23	29/64	34
Wartość średnia	29	31/67	33

## 6. ODDZIAŁYWANIE NA ŚRODOWISKO

Badania w zakresie oddziaływania na środowisko prowadzone były przez Wydział Inżynierii Środowiska Instytutu Zaopatrzenia w Wodę i Budownictwa Politechniki Warszawskiej. Wstępne badania [23] wykazały, że parametry wyciągu wodnego z samego przetworzonego osadu nie spełniają wymogów określonych w [16]. Wynika z tego wniosek, że produkt nie może stanowić samodzielnego materiału do zastosowań geotechnicznych, np. do budowy nasypów lub ulepszonego podłoża bądź warstw konstrukcji nawierzchni.

Znacznie korzystniejsze wyniki badań uzyskuje się po wymieszaniu produktu z gruntem. Występuje wtedy zmniejszenie się koncentracji szkodliwych składników tj. metali ciężkich (Pb, Ni, Cr, V, Zn). Wyniki badań laboratoryjnych wymywalności wykazały, że 6% dodatek do gruntów nie stanowi zagrożenia dla środowiska. Badania próbek wody pobranej z piezometrów zlokalizowanych w pobliżu odcinków próbnych nie wykazały zagrożenia dla środowiska nawet przy stosowaniu 8% dodatku produktu. Badania pod kątem oddziaływania na środowisko będą kontynuowane przez okres 2 lat

## 7. WNIOSKI

Przedstawione w niniejszej publikacji wyniki badań produktu powstałego z zestalenia metodą ORTWED uwodnionych osadów porafineryjnych z PKN ORLEN S.A. w Płocku upoważniają do sformułowania następujących wniosków:

- Przetworzony osad 30÷40% dodatkiem wapna palonego mielonego do postaci stałej w instalacji ORTWED posiada właściwości stabilizujące grunty spoiste i małospoiste. Pod względem uziarnienia wg klasyfikacji geotechnicznej przetworzony osad odpowiada pyłom. Jest materiałem niewysadzinowym koloru jasno-brunatnego lub jasno-szarego.
- Przetworzony osad nie może stanowić samodzielnego materiału do zastosowań geotechnicznych ze względu na dużą koncentrację szkodliwych składników (metali ciężkich i substancji ropopochodnych). Jego rozproszenie w ilościach 2÷9% w materiale mineralnym pozwala na bezpieczne stosowanie pod względem ochrony środowiska.
- Stwierdzono korzystny wpływ dodatku przetworzonego osadu do gruntów spoistych i małospoistych. Przeprowadzone badania wykazały, że grunty stabilizowane niewielkim dodatkiem przetworzonego osadu w ilościach 2÷9% uzyskują wzrost wskaźnika nośności  $W_{noś}$  podobnie jak przy stabilizacji gruntów wapnem hydratyzowanym.
- Dodatek przetworzonego osadu wpływa korzystnie na zmianę stopnia wysadzinowości gruntów spoistych i małospoistych. Uzyskuje się wzrost wartości wskaźnika piaskowego  $WP$  kwalifikujący grunt do innej grupy .
- Nie stwierdzono korzystnego wpływu dodatku przetworzonego osadu (do 12%) jako stabilizatora do gruntów niespoistych, gdyż nie uzyskiwano w tym przypadku wysokiej poprawy wskaźnika nośności  $W_{noś}$ .
- Zwiększony dodatek przetworzonego osadu nie spełnia wymogów ekologicznych.
- Nowoczesna metoda przetwarzania osadów wapnem palonym CaO pozwoli na szersze zagospodarowanie odpadów porafineryjnych w drogownictwie.
- Z uwagi na dofinansowywanie przez PKN ORLEN przetwarzania odpadów porafineryjnych wynika niski koszt pozyskiwania produktu z przetworzonych osadów. Zastosowanie tego materiału jako spoiwa (przetworzonego osadu) do wykorzystania na szerszą skalę w drogownictwie przynieść może wymierne korzyści ekonomiczne administracji, inwestorom i wykonawcom robót drogowych.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Tokaj W., Wileński P.: Sprawozdanie z pracy badawczej realizowanej w ramach bloku nr 64 pt: Wstępne rozpoznanie możliwości wykorzystania odpadów petrochemicznych utylizowanych metodą ORTWED do stabilizacji gruntów - IBDiM 2000 r. praca niepublikowana

- [2] Ustawa o odpadach z dnia 27 kwietnia 2001 r. Dz. U. Nr 62, poz. 628
- [3] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 27 września 2001 r. w sprawie katalogu odpadów (Dz. U. Nr 112, poz. 1206)
- [4] PN-S-96035:1977 Drogi samochodowe. Popioły lotne
- [5] PN-EN 451 - 1 Metoda badania popiołu lotnego - Oznaczanie zawartości wolnego tlenku wapnia
- [6] PN-86/B-02480 Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów
- [7] PN-S-02205: 1998 Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania
- [8] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie; Dziennik Ustaw nr 43 poz. 430
- [9] BN-64/8931-01 Drogi samochodowe. Oznaczanie wskaźnika piaskowego
- [10] PN-60/B-04493 Grunty budowlane. Oznaczanie kapilarności biernej
- [11] PN-S-96012:1998 Drogi samochodowe. Podbudowa i ulepszone podłoże z gruntu stabilizowanego cementem
- [12] PN-S-96011:1998 Drogi samochodowe. Stabilizacja gruntów wapnem do celów drogowych
- [13] BN-71/8933-10 Drogi samochodowe. Podbudowa z gruntów stabilizowanych aktywnymi popiołami lotnymi
- [14] PN-88/B-04481 Grunty budowlane. Badania próbek gruntu
- [15] Sprawozdanie z badań przydatności gruntów do stabilizacji zestalonym produktem z osadów porafineryjnych na terenie powiatu Płockiego, IBDiM 2002 r., Laboratorium Geotechniki; praca zespołowa
- [16] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego. (Dz. U. Nr 212, poz. 1799)
- [17] Dynamischer Platendruckversuch – Schnellprüfverfahren für die Qualitätssicherung von ungebundenen Schichten-Kudla, Floss, Trautmann – 1987
- [18] Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau TP BF -StB Teil B 8.3; Dynamischer Plattendruckversuch mit Hilfe des Leichten Fallgewichtsgerätes, Ausgabe 1997
- [19] *Rafalski L.*: Metoda badania zagęszczenia podtorza za pomocą płyty obciążanej dynamicznie. Prace IBDiM, 3/1985
- [20] CONTROLS - Instruction manual. IMPact soil tester. Cat 34-T0168/A

- [21] Sprawozdanie z badań przydatności gruntu do stabilizacji zestalonym produktem z osadów porafineryjnych na terenie nawierzchni Targowiska Miejskiego w Piasecznie wraz z badaniami terenowymi odcinków doświadczalnych - załącznik nr 1 A, 1B, IB-DiM, 2002; Laboratorium Geotechniki; praca zespołowa
- [22] Katalog typowych nawierzchni podatnych i półsztywnych. Instytut Badawczy Dróg i Mostów, GDDP, Warszawa 1997
- [23] *Barkiewicz. B, Obierak I.*: Wstępne badania chemiczne zastosowania produktu ORTWED w budownictwie drogowym w aspekcie oddziaływania na środowisko. Praca niepublikowana, Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Środowiska, Warszawa 2001

## **UTILIZATION OF POST - REFINERY OIL SLUDGE FOR SOIL STABILISATION IN ROAD CONSTRUCTION PART II: Trial sections tests**

### **Abstract**

Tests confirmed product's stabilizing properties, constituting a basis for manufacturing and testing of field trial sections. Section tests covered both the technical aspect and the environmental protection regulations. The research is conducted within the Polish-Danish EUREKA – Soilstabsorbent project in joint effort with the Warsaw University of Technology, Wrocław University of Technology, Ecological Service Department of National Environmental Protection Foundation in Płock - Ekoglobe.