STANISŁAW PISARCZYK<sup>1)</sup>

## WPŁYW ENERGII ZAGĘSZCZANIA NA JAKOŚĆ ZAGĘSZCZENIA GRUNTÓW

**STRESZCZENIE.** W artykule przedstawiono zależności wskaźnika zagęszczenia  $I_s$  i wilgotności optymalnych  $w_{opt}$  od energii zagęszczania dla różnych gruntów. Przedstawiono również zależność maksymalnych gęstości objętościowych szkieletu gruntowego uzyskanych zmodyfikowaną metodą Proctora od maksymalnych gęstości objętościowych szkieletu gruntowego uzyskanych standardową metodą Proctora i zależność między odpowiednimi wilgotnościami optymalnymi.

### 1. WSTĘP

Grunty zagęszczane (nasypane) stosuje się do wykonywania budowli ziemnych takich jak: zapory wodne, obwałowania rzek i zbiorników wodnych, nasypy komunikacyjne i makroniwelacyjne oraz zasypki fundamentów i ścian oporowych, zasypki wykopów sieci cieplnych i wodnych itp. Przy wykonywaniu nasypów budowlanych wymaga się, aby grunt w nasypie był odpowiednio zagęszczony. Miarą zagęszczenia gruntów w nasypach jest wskaźnik zagęszczenia  $I_s$  wyznaczany z wzoru:

$$I_s = \frac{\rho_d}{\rho_{ds}}, \quad (1)$$

gdzie:

$\rho_d$  – gęstość objętościowa szkieletu gruntowego gruntu w nasypie ( $\text{g/cm}^3$ ),

$\rho_{ds}$  – maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego gruntu z nasypu, przy wilgotności optymalnej ( $\text{g/cm}^3$ ).

<sup>1)</sup> prof. dr hab. inż. – Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska

W polskich normach i warunkach technicznych do oznaczenia  $I_s$  maksymalną gęstość objętościową szkieletu  $\rho_{ds}$  przyjmuje się na podstawie badań wg standardowej metody Proctora (oznaczenie autora  $\rho_{ds,ST}$ ) [1].

Przyjmuje się, że grunt w nasypie jest odpowiednio zagęszczony, jeżeli jego wskaźnik zagęszczenia  $I_s$  jest większy od wymaganego wskaźnika zagęszczenia  $I_{SW}$  założonego w projekcie dla danego nasypu. Wymagane wskaźniki zagęszczenia  $I_{SW}$  dla nasypów w zależności od ich przeznaczenia podają odpowiednie normy budowlane i warunki techniczne [2 – 4]. Przeważnie przyjmuje się, że  $I_{SW} \geq 0,95$ . Należy mieć na uwadze, że od zagęszczenia gruntu i jego wilgotności zależą jego parametry mechaniczne takie jak: spójność, kąt tarcia wewnętrznego i moduł ściśliwości oraz przepuszczalność [5].

Autor na podstawie badań własnych laboratoryjnych i polowych ustalił zależności wskaźnika zagęszczenia  $I_s$  od energii zagęszczania dla różnych gruntów oraz zależność maksymalnych gęstości objętościowych szkieletu z badań zmodyfikowaną metodą Proctora ( $\rho_{ds,ZM}$ ) od maksymalnych gęstości objętościowych szkieletu z badań standardową metodą Proctora ( $\rho_{ds,ST}$ ) i zależność odpowiednich wilgotności optymalnych ( $w_{opt,ZM} = f(w_{opt,ST})$ ).

## 2. BADANIA LABORATORYJNE WPŁYWU ENERGII ZAGĘSZCZANIA NA ZAGĘSZCZENIE GRUNTÓW

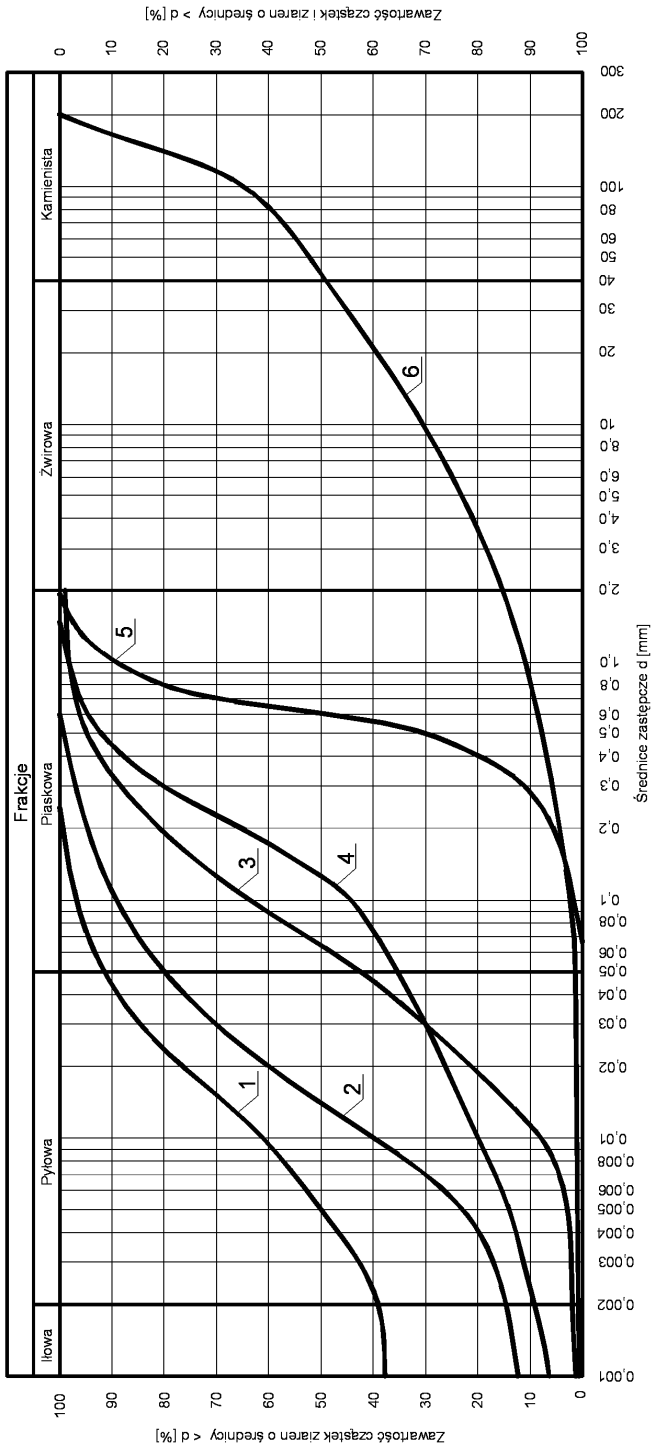
Badaniami objęto grunty drobnoziarniste i kamieniste oraz odpady (popiół lotny z węgla kamiennego i odpady z dekarbonizacji wody). Uziarnienie badanych gruntów przedstawiono na rys. 1. Granice konsystencji i wskaźnik plastyczności badanych gruntów spoistych podano w tablicy 1.

Tablica 1. Granice konsystencji i wskaźnik plastyczności badanych gruntów spoistych

Table 1. Consistency limits and plasticity index of tested cohesive soils

Wyszczególnienie	Łł pyłasty ( $I_{\Pi}$ )	Piasek gliniasty ( $P_g$ )
Granica płynności, $w_L$	70,9 %	26,6 %
Granica plastyczności, $w_p$	26,0 %	10,9 %
Wskaźnik plastyczności, $I_p$	44,9 %	15,7 %

Badania zagęszczalności gruntów drobnoziarnistych ( $I_{\Pi}$ ,  $P_g$  i  $P_r$ ) wykonano na próbkach o różnych wilgotnościach przy różnych energiach zagęszczania: 0,0 J/cm<sup>3</sup> (luźno nasypane); 0,053 J/cm<sup>3</sup>; 0,107 J/cm<sup>3</sup>; 0,214 J/cm<sup>3</sup>; 0,321 J/cm<sup>3</sup>; 0,429 J/cm<sup>3</sup>; 0,536 J/cm<sup>3</sup>; 0,59 J/cm<sup>3</sup> i 2,65 J/cm<sup>3</sup>. Pozostałe grunty i odpady zagęszczano przy energiach: 0,0 J/cm<sup>3</sup> (luźno nasypane), 0,59 J/cm<sup>3</sup> i 2,65 J/cm<sup>3</sup>. Dla każdej energii zagęszczania określono maksymalną wartość  $\rho_{ds,E}$  i  $w_{opt,E}$ , a następnie dla wartości  $\rho_{d,E}$  obliczono wskaźnik zagęszczenia  $I_s$  w odniesieniu do  $\rho_{ds,ST}$ .



Rys.1. Krzywe uziarnienia badanych gruntów:

- 1 - il pusty, 2 - osady z dekarbonizacji wody, 3 - popiół lotny, 4 - piasek gliniasty,
- 5 - piasek gruby, 6 - grunt kamienisty

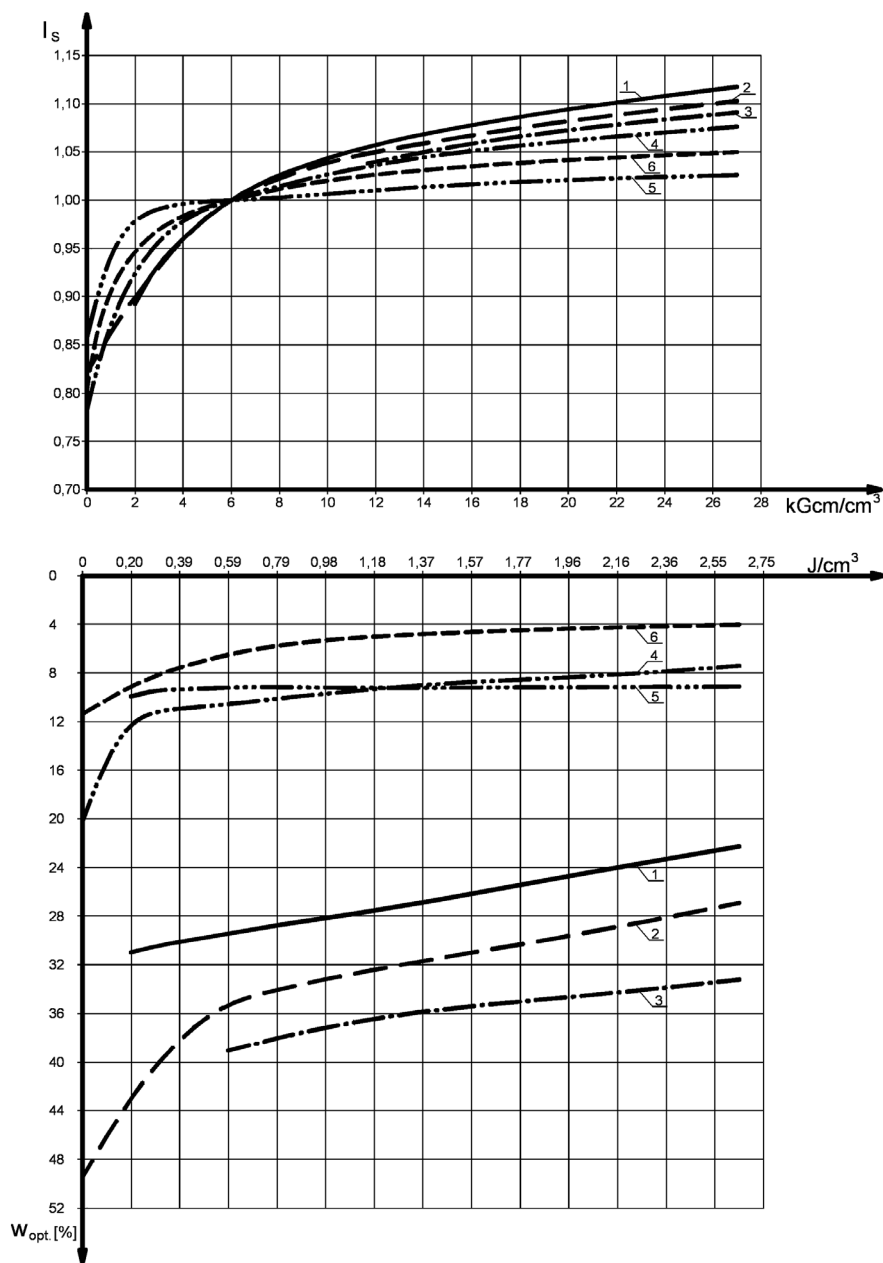
Fig.1. Grain size distribution of tested soils:

- 1 - silty clay, 2 - lime softening sludge, 3 - fly ash, 4 - sandy clay, 5 - coarse sand,
- 6 - cobble soil

Grunty drobnoziarniste i odpady badano w mechanicznym aparacie Proctora w małym cylindrze [1], a grunty kamieniste w wielkowymiarowym aparacie typu Proctora [6 – 7].

Wyniki badań wpływu energii na wskaźnik zagęszczenia ( $I_s$ ) i wilgotność optymalną ( $w_{opt}$ ) przedstawiono na rys. 2. Z przedstawionych danych wynika, że wskaźnik zagęszczenia (liczony w stosunku do  $\rho_{ds,ST}$ ) wzrasta ze wzrostem energii. Największy przyrost zagęszczenia od stanu luźnego występuje przy wzroście energii do energii standardowej (normalnej), a następnie przyrost  $I_s$  przy energii zmodyfikowanej wynosi tylko od 2,5% – dla piasku grubego do 12 % – dla iłu pylastego w stosunku do zagęszczania przy energii standardowej.

Ze wzrostem energii zagęszczania zmniejsza się wilgotność optymalna. Największy wpływ energii zagęszczania na  $w_{opt}$  występuje w gruntach spoistych i odpadach (osadach z dekarbonizacji wody i popiołach lotnych).

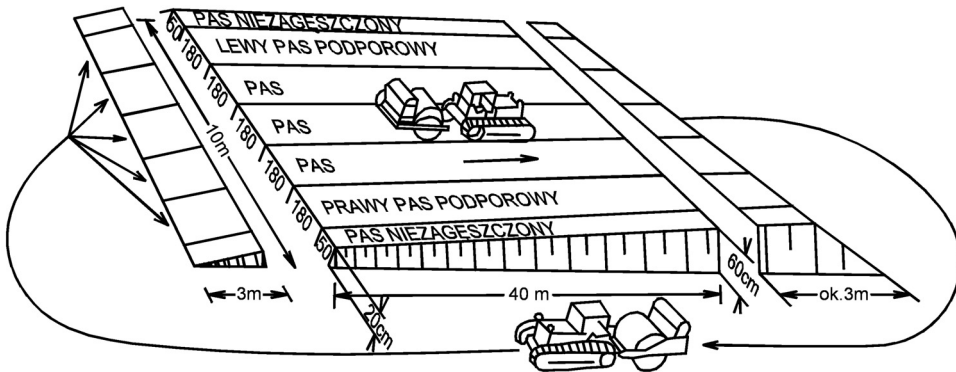


Rys.2. Zależność wskaźnika zagęszczenia ( $I_s$ ) i wilgotności optymalnej ( $w_{opt}$ ) od energii zagęszczenia: 1 - łą pylasty, 2 - osady z dekarbonizacji wody, 3 - popiół lotny, 4 - piasek gliniasty, 5 - piasek grubo, 6 - grunt kamienisty

Fig.2. Degree of compaction ( $I_s$ ) and optimum water content ( $w_{opt}$ ) in relation to compaction energy: 1 - silty clay, 2 - lime softening sludge, 3 - fly ash, 4 - sandy clay, 5 - coarse sand, 6 - cobble soil

### 3. BADANIA POLOWE ZAGĘSZCZALNOŚCI GRUNTÓW

Przy większych robotach ziemnych wykonawca nasypów, w celu doboru właściwej technologii wykonawstwa i odpowiedniego sprzętu zagęszczającego, wykonuje wcześniej próbne zagęszczenia na poletku doświadczalnym na budowie. Przykład poletka przedstawia rysunek 3.



Rys.3. Przykład poletka doświadczalnego

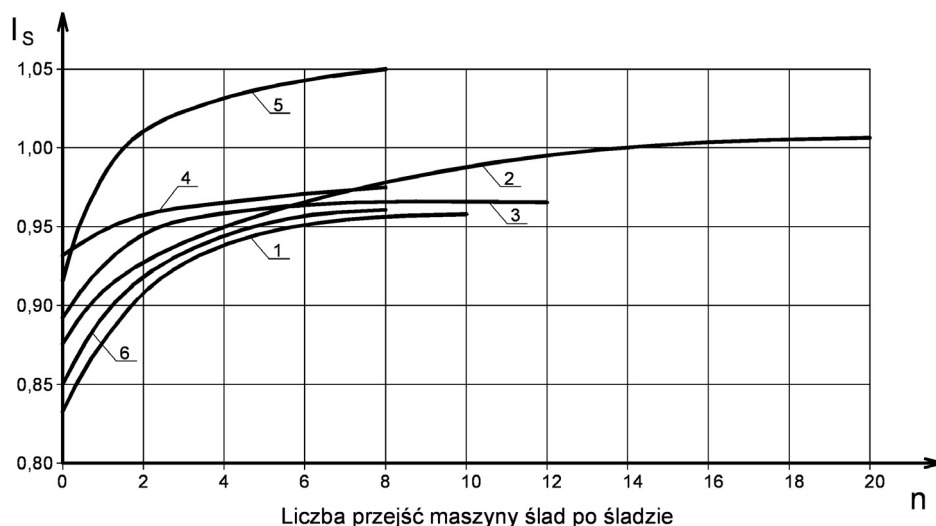
Fig.3. Example of experimental plot

Wykonanie poletka badawczego jest częścią programu zapewnienia odpowiedniej jakości robót na nasypie budowlanym. Badania na poletku badawczym gruntu przewidzianego na nasyp ma na celu:

- wykazanie przydatności przewidzianego gruntu jako materiału odpowiedniego na projektowany nasyp,
- oceny metod obróbki i przygotowania masy gruntowej,
- dobranie odpowiedniej (optymalnej) metody układania i zagęszczania masy gruntowej o odpowiedniej wilgotności oraz wybór odpowiedniego sprzętu,
- ustalenie ostatecznych zasad, w celu zapewnienia odpowiedniej jakości i kontroli wykonawstwa projektowanego nasypu.

Na rys. 4 przedstawiono przykładowe wyniki badań zagęszczenia na poletkach doświadczalnych 5 różnych gruntów za pomocą różnych maszyn.

Z przedstawionych zależności wskaźnika zagęszczenia  $I_s$  od liczby przejść maszyny zagęszczających ślad po śladzie wynika, że ze wzrostem liczby przejść maszyny wzrasta  $I_s$  i ustala się dla gruntów spoistych po liczbie przejść od 4 – 16. Wskaźnik zagęszczenia  $I_s = 0,95$  dla badanych gruntów spoistych i popiołu lotnego uzyskano przy liczbie przejść maszyny od 3 do 6 razy ślad po śladzie, dla piasku średniego po około 2 przejściach, a dla gruntu kamienistego przy 2 przejściach uzyskano  $I_s = 1,01$ .



Rys.4. Zależność wskaźnika zagęszczenia  $I_s$  od liczby przejazdów maszyny:

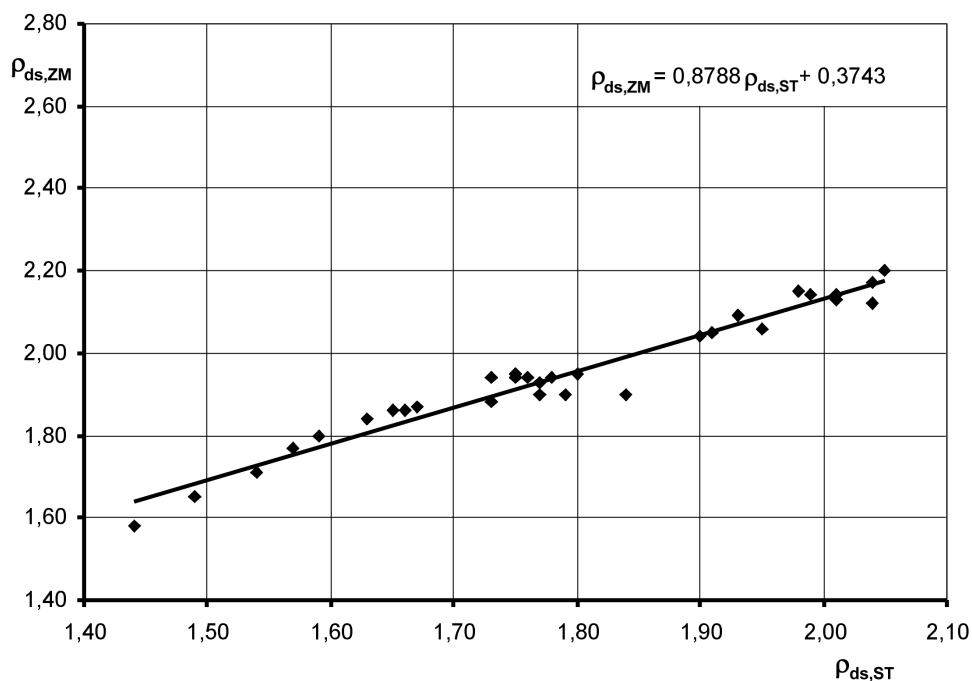
- 1 - grunt (głina) zagęszczany zagęszczarką wibracyjną WZK-10;  
grubość warstwy 22 cm,  $w = 1,23 w_{opt}$ ,
- 2 - grunt (ił) zagęszczany walcem ogumionym (46 t); grubość warstwy 30 cm,  $w = w_{opt}$ ,
- 3 - grunt (głina pylasta) zagęszczany spycharką D-157;  
grubość warstwy 21 cm,  $w = 1,12 w_{opt}$ ,
- 4 - grunt (piasek średni) zagęszczany zagęszczarką wibracyjną WZK-10;  
grubość warstwy 40 cm,  $w \approx 0,5 w_{opt}$ ,
- 5 - grunt kamienisty (uziarnienie  $d < 200$  mm)  
zagęszczany walcem WDJ-0,6; grubość warstwy 40 cm,  $w \approx w_{opt}$ ,
- 6 - popiół lotny zagęszczany spycharką S-100; grubość warstwy 40 cm,  $w = 0,85 w_{opt}$

Fig.4. Relationship between degree of compaction  $I_s$  and number of passes machine:

- 1 - soil (sandy-clayey silt) compacted by vibratory plate compactor WZK-10  
layer thickness 22 cm,  $w = 1,23 w_{opt}$ ,
- 2 - soil (clay) compacted by tires roller (46 t);  
layer thickness 30 cm,  $w = w_{opt}$ ,
- 3 - soil (clayey silt) compacted by bulldozer D-157;  
layer thickness 21 cm,  $w = 1,12 w_{opt}$ ,
- 4 - soil (medium sand) compacted by vibratory plate compactor WZK-10;  
layer thickness 40 cm,  $w \approx 0,5 w_{opt}$ ,
- 5 - cobble (granulation  $d < 200$  mm) compacted by roller WDJ-0,6;  
layer thickness 40 cm,  $w = w_{opt}$ ,
- 6 - soil (fly ash) compacted by bulldozer S-100; layer thickness 40 cm,  $w = 0,85 w_{opt}$ ,

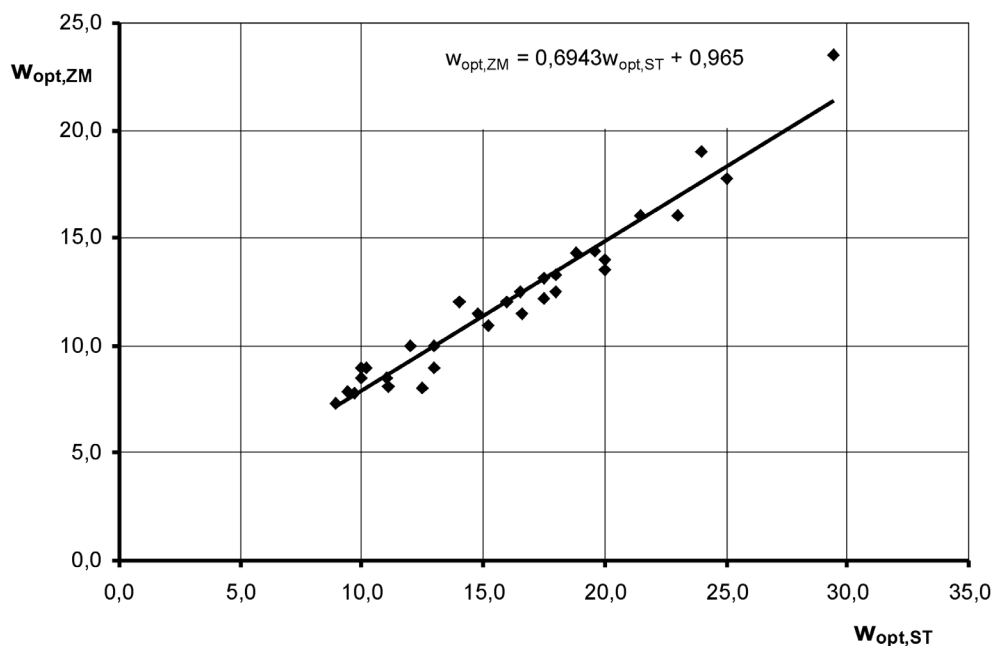
#### 4. ZALEŻNOŚCI POMIĘDZY PARAMETRAMI $\rho_{ds}$ I $w_{opt}$ DLA GRUNTÓW SPOISTYCH UZYSKANymi Z BADAŃ ZMODYFIKOWANĄ I STANDARDOWĄ METODĄ PROCTORA

Na podstawie badań 32 gruntów spoistych, od piasków gliniastych do ilów pylastych, w aparacie Proctora metodą standardową (oznaczone wartości  $\rho_{ds,ST}$  i  $w_{opt,ST}$ ) i zmodyfikowaną (oznaczone wartości  $\rho_{ds,ZM}$  i  $w_{opt,ZM}$ ) ustalono zależności  $\rho_{ds,ZM} = f(\rho_{ds,ST})$  i  $w_{opt,ZM} = f(w_{opt,ST})$  (rys. 5 i 6). Z przedstawionych danych widać, że istnieje dobra korelacja pomiędzy rozpatrywanymi parametrami. Średnia wartość  $\rho_{ds,ZM} / \rho_{ds,ST} = 1,09$ , a  $w_{opt,ZM} / w_{opt,ST} = 0,76$ . Przedstawione dane pozwalają określić wskaźnik zagęszczenia gruntów spoistych w odniesieniu do badań zagęszczalności metodą zmodyfikowaną mając dane z metody standardowej.



Rys.5. Zależność  $\rho_{ds,ZM}$  od  $\rho_{ds,ST}$   
Fig. 5. Relationship between  $\rho_{ds,ZM}$  and  $\rho_{ds,ST}$





Rys. 6. Zależność  $w_{opt,ZM}$  od  $w_{opt,ST}$   
 Fig. 6. Relationship between  $w_{opt,ZM}$  and  $w_{opt,ST}$

## 5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Projektowanie i wykonawstwo większych robót nasypowych (nasypów budowlanych) powinno być poprzedzone dokładnymi badaniami laboratoryjnymi i terenowymi na poletkach badawczych.

Z przedstawionych danych wynika, że jakość zagęszczenia nasypów zależy od rodzaju gruntu i energii zagęszczania. Grunty niespoiste drobnoziarniste do uzyskania odpowiedniego zagęszczenia wymagają mniej energii niż grunty spoiste. Dla gruntów niespoistych wzrost energii zagęszczania ze standardowej do zmodyfikowanej powoduje wzrost  $I_s$  o ok. 3,0 % (wg Wiłuna [8] 5 %), a dla bardzo spoistych o ok. 12 % (wg Wiłuna 6 %). Odpady (popioły i osady z dekarbonizacji wody) zachowują się podobnie jak grunty spoiste.

Wskaźnik zagęszczenia  $I_s = 0,95$  dla badanych na poletkach gruntów spoistych i popiołu lotnego z węgla kamiennego uzyskano przy liczbie przejść maszyny od 3 do 6 razy ślad po śladzie, dla piasku średniego po około 2 przejściach, dla gruntu kamiennego przy 2 przejściach uzyskano  $I_s = 1,01$ .

Średnia wartość  $\rho_{ds,ZM} / \rho_{ds,ST}$  dla gruntów spoistych wynosi 1,09, a  $w_{opt,ZM} / w_{opt,ST}$  wynosi 0,76.

**BIBLIOGRAFIA**

- [1] PN-88/B-04481 Grunty budowlane. Badania próbek gruntu
- [2] PN-B-06050 (1999). Geotechnika. Roboty ziemne. Wymagania ogólne
- [3] PN-S-02205 (1998) Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania
- [4] Roboty ziemne. Warunki techniczne wykonywania i odbioru. Ministerstwo Ochrony Środowiska Zasobów Naturalnych i Leśnictwa, 71, Warszawa 1994
- [5] *Pisarczyk S.*: Badania geotechniczne gruntów spoistych stosowanych do budowy uszczelnień mineralnych składowisk odpadów komunalnych. *Gospodarka Wodna*, nr 9/2000, 341 - 345
- [6] *Pisarczyk S.*: Gruntoznawstwo inżynierskie. Wyd. Naukowe PWN, Warszawa 2001, 346
- [7] *Pisarczyk S.*: Grunty nasypowe. Właściwości geotechniczne i metody ich badania. Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2004, 238
- [8] *Wilun Z.*: Zarys geotechniki. Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa 1982, 695

**THE INFLUENCE OF THE COMPACTION ENERGY  
ON QUALITY OF COMPACTED SOILS****Abstract**

In the paper the degree of compaction  $I_s$  and the optimum water content for different soils are presented and discussed in relation to the compaction energy.

The relationship between the maximum dry density obtained using Modified Proctor Method and the maximum dry density obtained with Standard Proctor Method is found; the relationship between the corresponding optimum water content is also provided.