

Konsolidacja gruntów organicznych przy wykorzystaniu drenażu pionowego w kontekście bezwymiarowego czynnika czasu konsolidacji na przykładzie inwestycji drogowej

Tomasz Białobrzeski¹



Vertical drains as accelerating organic soils consolidation method in the context of the dimensionless time factor on the example of road realization. *Prz. Geol.*, 62: 549–552.

Abstract. One of the oldest method of soil improvement is consolidation method. For analysis of settlements it is important to take correctly vertical consolidation coefficient as well as horizontal especially in organic, anisotropic soils. Large variations of filtering organic soils characteristic is depended on direction what is very problematic in estimating representative value. In this article there was shown a comparison between Barron's and Hansbo's model results with settlements measured on the example of road realization in the context of horizontal consolidation coefficient and dimensionless time factor.

Keywords: vertical drain, soils consolidation, consolidation coefficient, Barron's and Hansbo's model

Wybudowanie nasypów drogowych na gruntach nienośnych, przy braku zastosowania odpowiedniego wzmocnienia podłoża gruntowego, często prowadzi do awarii. To może się przejawiać spękaniami nawierzchni, nierównomiernym osiadaniem, „falowaniem nawierzchni” czy powierzchniowymi ruchami mas ziemnych.

Przy projektowaniu nasypów w trudnych warunkach gruntowych ważne jest uwzględnianie stanu granicznego użytkowania i nośności, na co bardzo duży wpływ ma prawidłowy dobór parametrów wydzieleni geologicznych. Wyjątkowo problematycznymi w budownictwie są grunty organiczne (np. torfy i namuły), które oprócz małej nośności cechują się nierzadko wysoką wilgotnością, dochodzącą nawet do kilkuset procent, dużą ścisłością i anizotropowością.

Do jednych z najstarszych sposobów polepszania parametrów wytrzymałościowych gruntów należą metody konsolidacyjne. Pierwotnie polegały one wyłącznie na zbudowaniu nasypu przeciążającego, który wymuszał osiadania konstrukcji ziemnej. W związku z tym, że czas potrzebny na ustabilizowanie się osiadań mógłby przekraczać nawet kilka lat, zaczęto stosować drenaż pionowy (dreny piaskowe lub prefabrykowane) wraz z nasypem przeciążającym, jako sposób przyspieszający ten proces.

ZAŁOŻENIA MODELU OBLICZENIOWEGO

Analizę prognozowania konsolidacji podłoża, bez wykorzystania drenażu pionowego, można sprowadzić do jednokierunkowej metody Terzagiego (1925, za Dobak, 1999). Zgodnie z tym sposobem, w celu usprawnienia obliczeń przebiegu konsolidacji, wprowadzony został bezwymiarowy weryfikalny czynnik czasu T_v (Terzaghi, 1925, za Dobak, 1999):

$$T_v = \frac{c_v \cdot t}{H^2}$$

gdzie:

H – droga drenażu,

c_v – współczynnik konsolidacji pionowej,

t – czas.

Wykorzystanie bezwymiarowego czynnika czasu konsolidacji T_v do różnych charakterystyk konsolidacyjnych

pozwała na ustandaryzowanie (ujednolicenie) wyników z różnych monitorowanych sekcji. Wprowadzenie T_v umożliwia również powiązanie współczynnika c_v oraz drogi drenażu H z wybranymi wartościami czasu konsolidacji (Dobak, 1999).

Zadanie obciążenia na podłożu ściśliwe jest jednym ze sposobów przyspieszających konsolidację gruntów. Na skutek wzrostu naprężeń efektywnych, dochodzi do rozproszenia ciśnienia w porach gruntu. W związku z tym, że dla $T_v = 1$ otrzymywane są wysokie wartości stopnia konsolidacji U , wyznaczony czas t dla $T_v = 1$ może umownie stanowić koniec procesu konsolidacji w praktyce inżynierskiej, w szczególności w gruntach o nienadmiernej ściśliwości wtórnej. Po przekształceniu wzoru na T_v , otrzymamy następującą zależność:

$$t_{v(T=1)} = \frac{H_2}{c_v}$$

Zmiany wartości bezwymiarowego czynnika czasu T_v , w zależności od stopnia konsolidacji i geometrycznego rozkładu ciśnienia porowego w warstwie ściśliwej dla wybranych T_v , przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Stopnie konsolidacji dla różnych przypadków rozkładu naprężeń w warstwie ściśliwej półotwartej (Wiłun, 2013)

Table 1. Consolidation ratio for different types of stress distribution in a compressible half-open layer (Wiłun, 2013)

Bezwymiarowy współczynnik czasu T_v [-] Time factor in vertical consolidation T_v [-]	Stopień konsolidacji dla rozkładu naprężeń Consolidation ratio for stress distribution	
	prostokątnego rectangular	liniowo-trójkątnego linear-triangular
	S_{k1} [-]	S_{k2} [-]
0,1	0,357	0,244
0,3	0,613	0,508
0,6	0,816	0,765
0,8	0,887	0,857
1,0	0,931	0,913
2,0	0,994	0,993

¹ Menard Polska Sp. z o.o., ul. J. Kochanowskiego 49a, 01-864 Warszawa; tbialobrzeski@menard.pl.

Stopień konsolidacji S_k określany jest w funkcji bezwymiarowego czynnika czasu T zgodnie z założeniami Terzagiego (1925, za Dobak, 1999):

$$S_k = 1 - \frac{8}{2\pi} \sum_{N=0}^{N=\infty} \frac{1}{(2N+1)^2} \exp \left[- (2N+1)^2 \pi^2 T_v \right]$$

W tabeli 2 przedstawiono wyliczone czasy konsolidacji odpowiadające czynnikowi czasu $T_v = 1$, czyli stopniowi konsolidacji $U = 0,931$, dla potencjalnych c_v i H . Teoretycznie, przy założeniu stałej wartości współczynnika konsolidacji oraz natychmiastowego przyłożenia obciążenia, otrzymane czasy w sposób poglądowy pokazują, jak długi mógłby być okres konsolidacji.

Na podstawie powyższego zestawienia widać, że okres konsolidacji, przy uwzględnieniu tylko jednokierunkowego rozproszenia nadwyżki ciśnienia wody w porach gruntu, znacznie przekracza czas potrzebny na budowę, np. odcinka drogi. W związku z powyższym, w celu przyspieszenia konsolidacji gruntów organicznych, stosowane są zabiegi przyspieszające ten proces w postaci prefabrykowanych drenów czy kolumn żwirowo-piaskowych (ryc. 1, 2).

W ten sposób otrzymujemy znaczne skrócenie czasu dyssypacji ciśnienia wody w porach gruntu. Tym większe im współczynnik konsolidacji poziomej c_h jest większy, a rozstaw drenów mniejszy. Na rycinie 3 przedstawiono instalowanie drenażu z widocznym na powierzchni terenu wpływem filtracyjnym wody z przestrzeni porowych.

Podstawy osiowo-symetrycznego modelu prognozowania przebiegu odkształceń gruntu zostały stworzone przez Barrona (1948), a następnie rozpowszechnione w zastosowaniach inżynierskich przez Hansbo (1981). Zgodnie z założeniami powyższych autorów dla konsolidacji radialnej, umowny czas konsolidacji T_r ma następującą postać:

$$T_r = \frac{c_h \cdot t}{D_e^2}$$

gdzie:

$D_e - 1,05L$ dla trójkątnego rozstawu drenów; $1,13L$ dla kwadratowego,
 $L -$ rozstaw drenów,
 $t -$ czas.

Wykorzystując powyższą zależność i zakładając $T_r = 1$, otrzymujemy wzór na t_h , przy założeniu tylko konsolidacji radialnej:

$$t_{h(T=1)} = \frac{D_e^2}{c_h}$$

Stopień konsolidacji całkowitej U w przypadku gruntów, gdzie wykorzystano drenaż pionowy, wyznacza się zgodnie z propozycją Carillo (1942):

$$U = U_r + U_v - U_h U_v$$

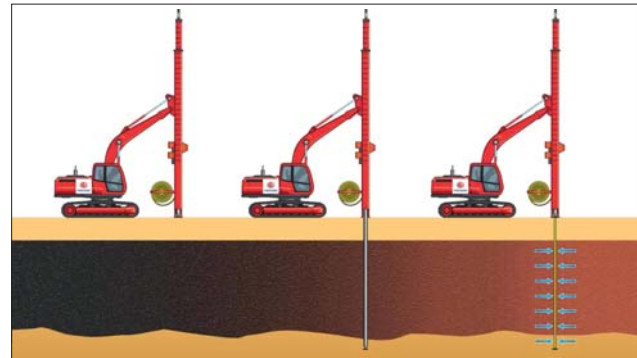
gdzie:

$U -$ stopień konsolidacji
 $U_r -$ stopień konsolidacji radialnej
 $U_v -$ stopień konsolidacji wertykalnej, który odpowiada stopniowi konsolidacji S_k wg Terzagiego.

Tab. 2. Wyliczone czasy zakończenia konsolidacji odpowiadające $T_v = 1$ dla potencjalnych c_v i H

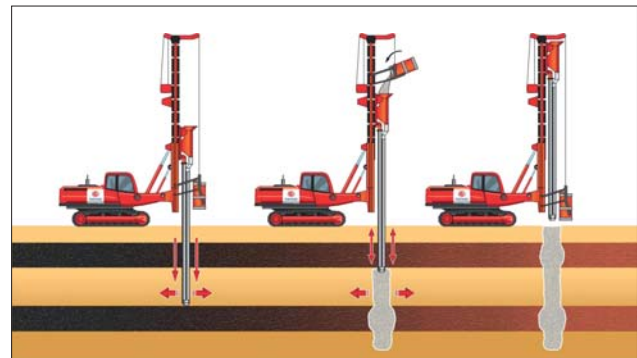
Table 2. Tentative times of completing consolidation for $T_v = 1$ and estimated c_v i H

H [m]	$t (c_v=2 \text{ m}^2/\text{y})$ [lata] [years]	$t (c_v=4 \text{ m}^2/\text{y})$ [lata] [years]	$t (c_v=6 \text{ m}^2/\text{y})$ [lata] [years]
3	4,5	2,3	1,5
5	12,5	6,3	4,2
7	24,5	12,3	8,2



Ryc. 1. Schemat wykonania drenów prefabrykowanych VD (www.menard.pl/technologie; czerwiec 2014)

Fig. 1. Prefabricated Vertical drains (www.menard.pl/technologie; June 2014)



Ryc. 2. Schemat wykonywania kolumn żwirowych SC (www.menard.pl/technologie)

Fig. 2. Stone columns execution (www.menard.pl/technologie)



Ryc. 3. Wykonywanie drenażu pionowego. Fot. E. Majer

Fig. 3. Execution of vertical drain. Photo by E. Majer

Stopień konsolidacji poziomej U_r na podstawie prac Barrona (1948) i Hansbo (1981), ma następującą postać:

$$U_r = 1 - e^{-\frac{8T_r}{f(n)}}$$

gdzie:

$$f(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \left[\ln(n) - \frac{3}{4} + \frac{1}{n^2} \left(1 - \frac{1}{4n^2} \right) \right]$$

$$n = \frac{R}{r}$$

R – promień odwadnianego walca gruntu,
 r – promień drenu.

Dla $T_r = 1$ otrzymywane są dla potencjalnych wartości c_v , c_r , L i H wysokie wartości U przekraczające 0,9 (tab. 3), dlatego w praktyce inżynierskiej można wartość U , odpowiadającą $T_r = 1$, przyjmować jako umowną granicę konsolidacji pierwotnej. W związku z zainstalowaniem drenów pionowych w rozstawie L , skracana jest droga drenażu, bowiem nadwyżka wody z porów może przepływać poziomo do drenów. Do analizowania przebiegu osiadań, niezbędnym parametrem jest zarówno współczynnik konsolidacji pionowej c_v , jak i poziomej c_r . W celu porównania umownych czasów konsolidacji, kiedy zastosowano drenaż pionowy z gruntami oraz kiedy ograniczono się tylko do nasypu przeciążającego (tab. 2), przeprowadzono obliczenia, przy uwzględnieniu potencjalnych wartości $c_v = 2 \text{ m}^2/\text{y}$, $c_h = 4 \text{ m}^2/\text{y}$, miąższości warstwy gruntów ściśliwych $H = 5 \text{ m}$ oraz rozstawów L . Wyliczone czasy t , które zostały zebrane w tabeli 3, oszacowano przy założeniu niezmienności wartości c_v i c_h oraz natychmiastowego jednokrotnego przyłożenia obciążenia.

Wyniki zebrane w tabeli 2 i 3 dają poglądowy obraz skrócenia czasu konsolidacji, gdy nie występuje lub występuje skrócona droga rozpraszania ciśnienia w porach gruntu. Zdecydowane zmniejszenie czasu, poprzez wykorzystanie drenażu pionowego, z punktu widzenia inżynierskiego sprawia, że metody te mogą z powodzeniem być stosowane przy budowie obiektów budowlanych na obszarach występowania gruntów ściśliwych, a w szczególności gruntów organicznych.

Przedstawione powyżej równanie opisujące U_r nie uwzględnia wpływu naruszenia struktury wokół pionowego drenu oraz oporu przepływu wody w drenie. Modyfikację równania na $f(n)$ uwzględniającą powyższe elementy przedstawił Hansbo (1981):

$$f(n) = \frac{n}{s} + \frac{k_h}{k'_h} \ln s - \frac{3}{4} + \pi x (2l - x) \frac{k_h}{q_w}$$

gdzie:

$s = d_s/2r$,

d_s – średnica strefy gruntu o nienaruszonej strukturze,

k_h – współczynnik filtracji w strefie nienaruszonej,

k'_h – współczynnik filtracji w strefie naruszonej,

l – długość drogi drenażu,

q_w – wydatek drenu,

x – współrzędna pionowa.

Na skutek instalowania drenu następuje naruszenie struktury wokół drenu, co prowadzi do pogorszenia

Tab. 3. Wyliczone czasy konsolidacji odpowiadające $T_v = 1$ dla potencjalnych c_v i H

Table 3. Tentative times of completing consolidation for $T_v = 1$ and estimated c_v and H

L [m]	$c_v = 2 \text{ m}^2/\text{y}$	$c_h = 4 \text{ m}^2/\text{y}$
	t [miesiące / month]	U [-]
1	3,8	0,96
1,5	8,6	0,94
2	15,3	0,94

właściwości filtracyjnych ośrodka znajdującego się w strefie o średnicy d_s , w związku z czym k'_h jest mniejsze od k_h . Opór przepływu wody w drenie opisywany jest przez wydatek drenu q_w , który zmienia się w zależności od rodzaju filtra, naprężenia efektywnego i czasu (Lechowicz & Szymański 2002). Wpływ naruszenia struktury, wywołanej instalacją drenu w gruncie, jest mało znaczący, ze względu na mały zasięg $d_s = 2-3d$ (Hansbo, 1981) oraz zdecydowanie mniejsze obniżenie wartości k_h wokół drenu w stosunku do zmniejszenia k_h w wyniku konsolidacji gruntu. Na podstawie zebranych obserwacji (Lechowicz & Szymański 2002), zmniejszenie k_h w gruntach organicznych, ze względu na instalację drenu, wyniosło około 10 razy, natomiast w wyniku zmniejszenia właściwości filtracyjnych ośrodka gruntowego w trakcie postępowania konsolidacji było 100-krotne.

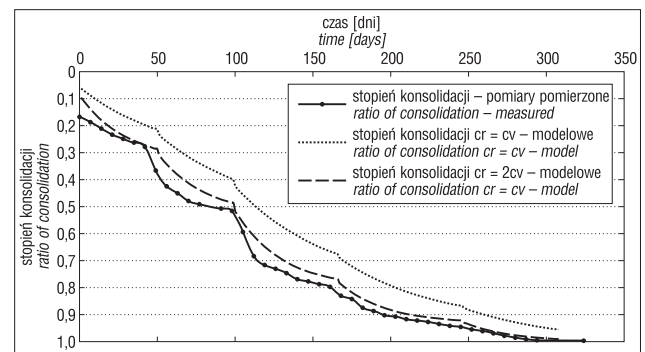
Zmienność wartości współczynnika filtracji, w trakcie badań konsolidacyjnych, świadczy o nieliniowym, złożonym charakterze procesu filtracji w gruntach spoistych. Dlatego w trakcie analiz konsolidacji gruntu istotne jest określenie:

– rozkładu ciśnienia wody w porach gruntu wywołującego przepływ wody w konsolidowanym gruncie na zmiany wartości parametrów filtracyjnych,

– zależności między parametrami filtracji a zmianami porowatości, występującymi w procesie konsolidacji (Dobak, 1999).

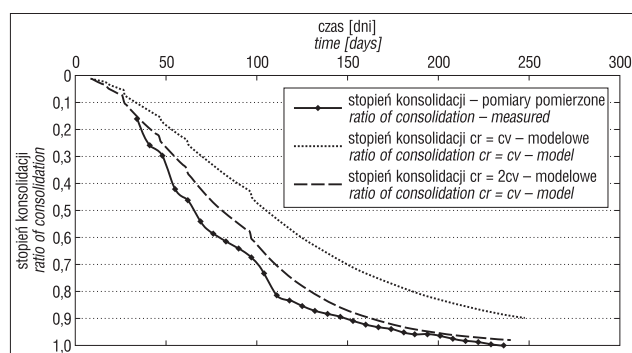
Przepuszczalność w kierunku poziomym – prostopadłym do obciążenia konsolidacyjnego, jest większa niż w kierunku pionowym – zgodnym z działaniem obciążenia, co prawdopodobnie wynika z preferencji orientacji cząstek szkieletu układających się prostopadle do obciążenia pionowego (Dobak, 1999). W przypadku gruntów organicznych, ze względu na ich dużą anizotropię oraz nieliniowość charakterystyk przepływu, powinny być wykonywane szczegółowe badania procesu konsolidacji (Lechowicz & Szymański, 2002). Wiąże się to z koniecznością wyznaczenia współczynnika konsolidacji zarówno w kierunku pionowym, jak i poziomym. W związku z powyższym ważne jest nie tylko właściwe przyjęcie współczynnika konsolidacji pionowej c_v , ale także współczynnika konsolidacji radialnej c_r , przy analizowaniu osiadań konsolidacyjnych w czasie.

Wykorzystując parametr stopnia konsolidacji, na rycinach 4 i 5 przedstawiono rzeczywiste pomiary osiadań oraz modelowe zachowanie dwóch profili drogi, które zostały poddane zabiegom przyspieszającym konsolidację przy wykorzystaniu prefabrykowanych drenów oraz nasypu przeciążającego, w zależności od założonego współczynnika konsolidacji poziomej.



Ryc. 4. Stopień konsolidacji na podstawie rzeczywistych pomiarów (Binder i in., 2012) oraz modelowych

Fig. 4. Measured (Binder i in., 2012) and model ratio of consolidation



Ryc. 5. Stopień konsolidacji na podstawie rzeczywistych pomiarów (Binder i in., 2012) oraz modelowych

Fig. 5. Measured (Binder i in., 2012) and model ratio of consolidation

Na podstawie tych rycin można stwierdzić, że otrzymywane wyniki modelowe są zaniżone w stosunku do wyników rzeczywistych pomierzonych w terenie. Może to być tłumaczone faktem, że omawiane modelowanie opiera się na analizie konsolidacji w warunkach małych odkształceń, przy pominięciu zmienności geometrii podłoża (Lechowicz & Szymański, 2002). Dla właściwej analizy przebiegu osiadań problematyczne jest właściwe przyjęcie c_v oraz c_r , w szczególności, gdy ten drugi współczynnik jest założony na podstawie pierwszego. Obliczenia przeprowadzono w dwóch wariantach, przy $c_r = c_v$ oraz $c_r = 2c_v$, co ukazało znaczną różnicę pomiędzy tymi dwoma podejściami. W celu zweryfikowania obliczeń, należy przeprowadzić badania laboratoryjne zarówno c_r , jak i c_v .

PODSUMOWANIE

W powyższym artykule ukazano, że przy analizowaniu przebiegu procesu konsolidacji istotne jest właściwe przyjęcie nie tylko współczynnika konsolidacji pionowej, ale również poziomej, w szczególności w gruntach organicznych – anizotropowych. Znaczna zmienność właściwości filtracyjnych takich gruntów, w zależności od rozpatrywanego kierunku, stwarza problem w oznaczeniu wartości charakterystycznych i obliczeniowych dla danego wydzielenia geologicznego.

Określanie stopnia konsolidacji metodą Barrona (1948) i Hansbo (1981) niesie ze sobą ryzyko otrzymywania wyników zaniżonych, co jest problematyczne w przypadku określania parametrów c_v i c_r tzw. „metoda odwrotną”, która polega na tym, że wyniki geodezyjne korelowane są z wynikami modelowymi, poprzez modyfikowanie parametrów geotechnicznych (w szczególności c_v , c_r). Dlatego jest ważne, żeby na etapie projektowania tego typu rozwiązań przeprowadzić rzetelne badania laboratoryjne, nie tylko współczynnika c_v , ale również nie mniej ważnego współczynnika c_r .

Wprowadzenie umownego czasu T pozwala usprawnić obliczenia przebiegu konsolidacji. W praktyce inżynierskiej przyjmowanie końca konsolidacji pierwotnej dla $T_r = 1$, jest uzasadnione, ze względu na otrzymywanie stosunkowo wysokich wartości stopnia konsolidacji U , znacznie powyżej 90%.

W gruntach ściśliwych, takich jak torfy, namuły, gytie czy gliny w stanie miękkoplastycznym i bardzo miękkoplastycznym, można z powodzeniem stosować drenaż w celu przyspieszenia konsolidacji. Jest to jedna z metod wzmocnienia podłoża, która pozwala maksymalnie wyko-



Ryc. 6. Nawierzchnia drogi A5 w Północnej Walii wybudowanej na gruntach organicznych (Nichol & Farmer, 1998)

Fig. 6. No. A5 Road surface in North Wales which was built on organic soils (Nichol & Farmer, 1998)

rzystać nośność ośrodka gruntowego bez wprowadzania dodatkowego medium, przy uwzględnieniu również ważnego kryterium ekonomicznego.

Historia pokazała wielokrotnie, że brak świadomości projektantów i wykonawców, o zagrożeniach wynikających z budowy dróg na gruntach wysoce ściśliwych, prowadzi do poważnych awarii czy katastrof budowlanych. Dobrym przykładem uszkodzenia nawierzchni drogi wybudowanej na gruntach organicznych jest odcinek A5 w Północnej Walii w okolicach miejscowości Cerrigydrudion. Trasa ta została wybudowana przez Thomasa Telford w roku 1810 w celu ułatwienia podróży konnymi dyliżansami z prędkością ok. 13 km/h. W związku z postępowaniem jaki dokonał się w motoryzacji, który przełożył się na wzrost obciążenia eksploatacyjnego, konsolidacja gruntów zaczęła postępować, co przejawiało się postępującymi w czasie osiadaniami. W ubiegłym wieku drogę wielokrotnie naprawiano, uzupełniając ubytki w nawierzchni, w efekcie czego miejscami miąższość asfaltu wynosi ok. 2 m. Pofalowaną powierzchnię zobrazowano na rycinie 6.

Pomimo rozwoju metod rozpoznania i wzmocnienia podłoża gruntowego nadal dochodzi do podobnych zniszczeń, które często wynikają z niewłaściwej ingerencji człowieka w warunki hydrogeologiczne.

LITERATURA

- BARRON R.A. 1948 – Consolidation of fine grained soils by drain wells. Transaction of the American Society of Civil Engineers, 113: 718–724.
- BINDER K. i in. 2012 – Projekt wzmocnienia podłoża gruntowego metodą drenażu pionowego pod nasypami drogowymi, Menard Polska [materiały niepublikowane].
- CARILLO N. 1942 – Simple two- and three-dimensional cases in the theory of consolidation of soils. Journal of Mathematical Physics and Mechanics, 21: 1–5.
- DOBĄK P. 1999 – Rola czynnika filtracyjnego w badaniach jednoosiowej konsolidacji gruntów, Studia Rozprawy Monografie, Kraków.
- HANSBO S. 1981 – Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains. Proc. Of the 10th Inter. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Stockholm, 3.
- LECHOWICZ Z. & SZYMAŃSKI A. 2002 – Odkształcenia i stateczność nasypów na gruntach organicznych, cz. II Metodyka Obliczeń, Wyd. SGGW.
- NICHOL D. & FARMER I.W. 1998 – Settlement over peat on the A5 at Pant Dedwydd near Cerrigydrudion, North Wales. Engineering Geology 50: 299–307.
- WIŁUN Z. 2013 – Zarys Geotechniki, WKiŁ, Warszawa.