

Geotechniczne aspekty budowy głębokich wykopów

Dr inż. Monika Mitew-Czajewska

Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej

W Warszawie prowadzi się obecnie wiele inwestycji (tuneli komunikacyjnych – metra i drogowych, parkingów podziemnych obiektów biurowych i mieszkalnych) wymagających wykonania głębokich wykopów. Kompleksowo opracowany projekt takiej budowli podziemnej powinien zawierać zarówno analizę statyczną ścian wykopu, jak i szczegółową analizę wpływu wykopu na otoczenie. Przeprowadzenie tych analiz jest możliwe jedynie na podstawie prawidłowo wykonanej, szczegółowej dokumentacji geotechnicznej. Niestety, często obserwuje się, że rozpoznanie geotechniczne prowadzone na potrzeby inwestycji jest mało szczegółowe, niedokładne i nie znajduje odzwierciedlenia w warunkach gruntowych stwierdzanych podczas budowy. W rejonie Warszawy warunki geotechniczne są niezwykle złożone [1]. Tworzy trzeciorzędowe pokrywa pakiet różnorodnych gruntów czwartorzędowych, w obrębie których występują zwykle trzy warstwy wodonośne. Podłoże trzeciorzędowe jest zbudowane w głównej mierze z wysoce zaburzonych ilów plioceńskich, w których obserwuje się przewarstwienia z piasków drobnych i pylastych, zawierających wodę gruntową, często pod znacznym ciśnieniem.

Ze względu na opisaną złożoność warunków geotechnicznych dokładność rozpoznania geotechnicznego odgrywa kluczową rolę przy projektowaniu głębokich wykopów. W dalszej części referatu omówiono szczegółowo zagadnienie wpływu na wyniki obliczeń zarówno niewłaściwego szacowania parametrów wydzielonych warstw gruntu, jak i nieprecyzyjnej interpretacji przekrojów geotechnicznych. Przedstawiono dwa przy-

kłady z budowy stacji metra wchodzących w skład drugiej linii metra w Warszawie.

ANALIZA PRZYPADKÓW

Informacje ogólne

Dyskutowane obiekty – stacja metra Nowy Świat – Uniwersytet oraz stacja metra Świętokrzyska są zlokalizowane w niewielkiej odległości od siebie, na wysoczyźnie, w lewobrzeżnej części Warszawy. Ze względu na bliskość skarpy Warszawskiej głębokość wykopu obydwu stacji jest znacząca i wynosi około 25 m.

W rejonie omawianych obiektów warunki geologiczne są następujące:

- bezpośrednio pod powierzchnią terenu występują grunty nasypowe, antropogeniczne o miąższości około $3 \div 5$ m,
- poniżej zalegają fluwioglacjalne piaski drobne i średnie o zmiennej miąższości od 0 do 24 m,
- lokalnie, w obrębie lub poniżej piasków, występują gliny morenowe o zmiennej miąższości od 1 do 5 m,
- poniżej, do głębokości rozpoznania zalegają iły plioceńskie, wykształcone w postaci ilów, ilów pylastych, ilów pylastych zwięzłych.

Szczegółowe profile geotechniczne i parametry warstw przyjęte do analiz będą podane w dalszej części artykułu przy omawianiu każdego z obiektów.

W obydwu przypadkach analizę statyczną obudowy wykopu przeprowadzono z zastosowaniem metody parć zależnych. Wartości modułu reakcji podłoża określano z zastosowaniem teorii Chadeissona. Obliczenia przeprowadzono programem GEO5 Ściana analiza. Wyznaczano przemieszczenia oraz siły wewnętrzne w konstrukcji i analizowano ich zmienność w zależności od przyjętych założeń (parametrów warstw geotechnicznych oraz ich układu).

Stacja Nowy Świat – Uniwersytet

Ze względu na fakt, że maszyn gruntowy jest podstawowym obciążeniem budowli podziemnych, podstawę ich projektowania stanowi wybór charakterystycznych profili geotechnicznych i ustalenie parametrów obliczeniowych poszczególnych warstw. Układ warstw geotechnicznych w obrębie stacji metra Nowy Świat – Uniwersytet jest stosunkowo niezmienny, wobec czego interpretacja charakterystycznego profilu gruntu do analizy obliczeniowej nie przysporzyła problemów. W tym przypadku, ze względu na dominację ilów płoceńskich w profilu, kluczowym elementem okazało się określenie ich parametrów. W tym celu powołano kilka zespołów eksperckich – polskich i zagranicznych, których oszacowania parametrów ilów różniły się znacząco od siebie [2]. Na podstawie różnych źródeł (opracowania eksperckie, normy, dokumentacja geotechniczna, itp.) wydzielono 9 zestawów parametrów mechanicznych ilów płoceńskich i wykonano obliczenia statyczne typowego przekroju.

Wykop stacji Nowy Świat – Uniwersytet o głębokości 25,50 m był realizowany w obudowie ze ścian szczelinowych grubości 1,20 m z zastosowaniem metody stropowej z wykorzystaniem trzech stropów do rozparcia obudowy w fazie tymczasowej. Grubości poszczególnych stropów wynoszą odpowiednio (od najwyższego do najniższego): 1,2 m, 0,6 m, 0,5 m; grubość płyty fundamentowej – 1,2 m. Długość całkowita ściany szczelinowej w analizowanym miejscu wynosi 36 m.

W obliczeniach uwzględniono następujące fazowanie budowy:

Faza 1 – Wykonanie wykopu o głębokości 4,90 m p.p.t.;

Faza 2 – Wykonanie stropu stacji;

Faza 3 – Wykonanie wykopu do głębokości 9,80 m p.p.t.;

Faza 4 – Wykonanie pierwszego/górnego stropu pośredniego;

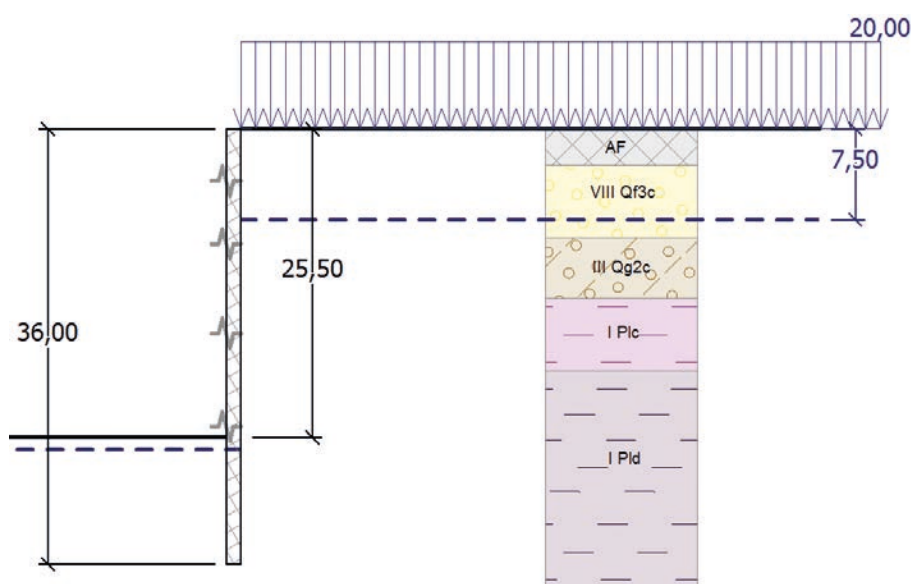
Tabl. 1. Parametry geotechniczne warstw gruntowych – stacja Nowy Świat – Uniwersytet

Warstwa geotechniczna	γ [kN/m ³]	ϕ' [°]	c' [kPa]
AF	18	25	0
VIII Qf3c	19	34	0
III Qg2c	21	31	3
I Plc	20	10	18
I Pld	21	15	18

Tabl. 2. Zestawienie parametrów ilów oraz wyniki obliczeń

Series	IPlc		IPlId			
	c' [kPa]	ϕ' [°]	c' [kPa]	ϕ' [°]	$u_{\max}$ [mm]	$M_{\max} / M_{\min}$ [kNm/m]
Seria 1	11	16	11	16	—*	
Seria 2	11	16	15	25	8,7	1130 / 1000
Seria 3	64	12,6	77	12,6	2,8	525 / 465
Seria 4	11	18	20	18	14	1670 / 1300
Seria 5	10	18	15	18	17,7	1885 / 1635
Seria 6	$c_{\text{tot}} = 30$	$\phi_{\text{tot}} = 13$	$c_{\text{tot}} = 30$	$\phi_{\text{tot}} = 13$	—*	
Seria 7	$c_{\text{tot}} = 45$	$\phi_{\text{tot}} = 9$	$c_{\text{tot}} = 50$	$\phi_{\text{tot}} = 11$	—*	
Seria 8	25	16	30	17	10	1300 / 1050
Seria 9	45	9	50	11	8,2	1295 / 1150

* ściana nie utwardzona pod dnem wykopu



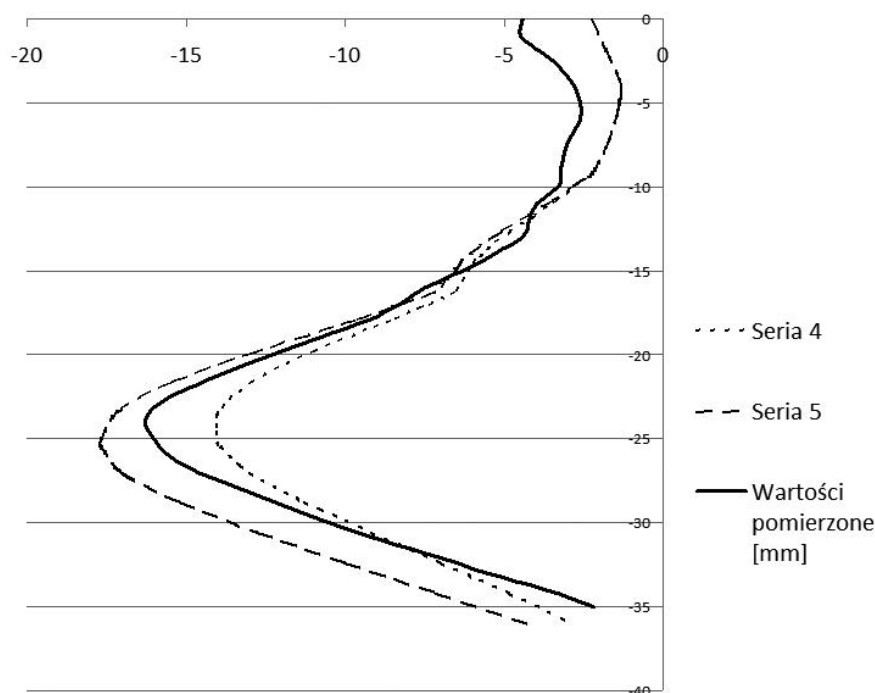
Rys. 1. Warunki geotechniczne, geometria modelu – stacja Nowy Świat - Uniwersytet

- Faza 5 – Wykonanie wykopu do głębokości 15,80 m p.p.t.;
- Faza 6 – Wykonanie trzeciego/dolnego stropu pośredniego;
- Faza 7 – Wykonanie wykopu docelowego, do głębokości 25,50 m p.p.t.;
- Faza 8 – Wykonanie płyty fundamentowej.

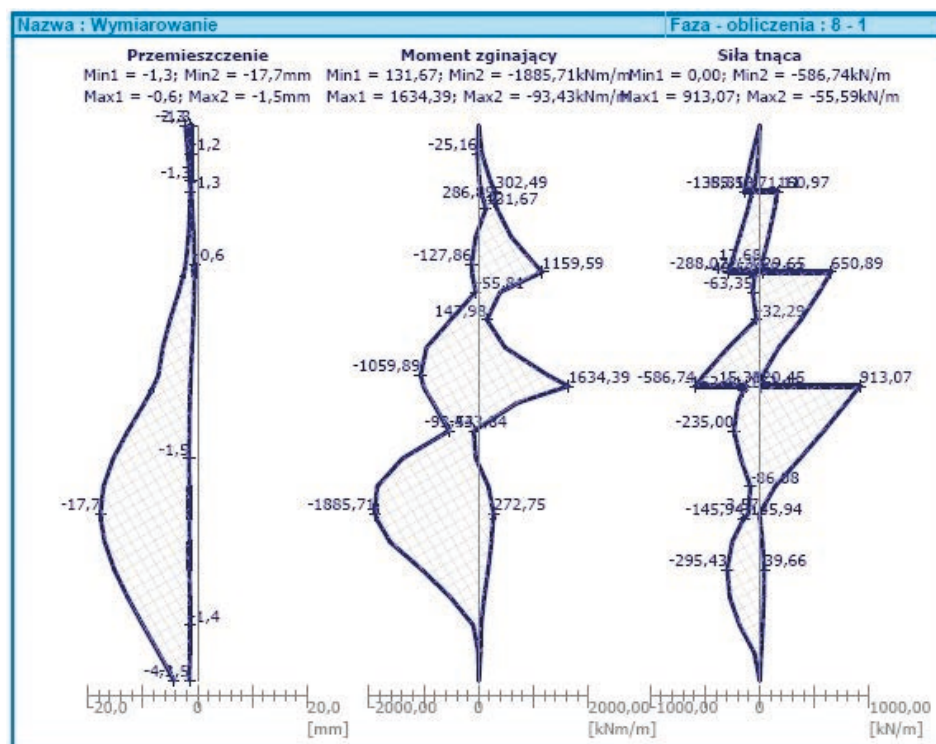
Warunki geotechniczne oraz geometrię modelu w wybranym do analizy przekroju przedstawiono na rys. 1.

Poziom zwierciadła wody gruntowej przyjęto na głębokości 7,5 m p.p.t. Parametry wydzielonych warstw gruntowych uwzględnione w analizie numerycznej podano w tabl. 1.

W tabl. 2 zestawiono parametry ilów plicieńskich (warstwy I Plc i I Pld), określone na podstawie różnych źródeł, przyjęte w analizie w kolejnych seriach obliczeniowych. W dwóch ostatnich kolumnach tabl. 2 podano także wyniki obliczeń poszczególnych serii (maksymalne przemieszczenia oraz momenty zginające).



Rys. 2. Wykresy przemieszczeń teoretycznych dwóch serii obliczeniowych (4 i 5) w odniesieniu do wyników pomiarów przemieszczeń



Rys. 3. Obwiednie przemieszczeń i sił wewnętrznych, Seria 5 – stacja Nowy Świat – Uniwersytet

Szczegółowy opis poszczególnych serii obliczeniowych oraz dyskusję wyników analiz przedstawiono w publikacji [2]. Należy jedynie podkreślić, że wyniki obliczeń najbliższe rzeczywistości (przeszaczenia teoretyczne ściany), w odniesieniu do wyników pomiarów przemieszczeń prowadzonych na budowie (rys. 2), uzyskano w Serii 5 na podstawie parametrów zaczerpniętych z ostatecznej dokumentacji geotechnicznej oraz w Serii 4, w której parametry ilów były określone przez ekspertów polskich. Na rys. 3 pokazano wyniki obliczeń Serii 5, w postaci obwiedni przemieszczeń i sił wewnętrznych.

Stacja Świętokrzyska

Istotnym elementem w projektowaniu obudów głębokich wykopów, obok ustalenia prawidłowych parametrów obliczeniowych warstw geotechnicznych, jest określenie charakterystycznych (typowych) profili geotechnicznych. Na terenie stacji Świętokrzyska układ warstw geotechnicznych jest bardzo zmienny, dlatego w celu właściwego ich rozpoznania, na przestrzeni całego procesu inwestycyjnego, przeprowadzono wiele badań geotechnicznych, których wyniki różniły się znacząco. Zmienność profili geotechnicznych wykreślonych wzdłuż dłuższych ścian wykopu na poszczególnych etapach rozpoznania oraz szczegółowe omówienie wyników analizy statycznej wybranego przekroju z uwzględnieniem tych zmian zawarto w referacie [3]. Poniżej przedstawiono jedynie podstawowe założenia przyjęte do obliczeń oraz sformułowano wnioski.

Wykop stacji Świętokrzyska o głębokości 24,70 m był realizowany w obudowie ze ścian szczelinowych grubości 1,20 m, z zastosowaniem metody stropowej, z wykorzystaniem trzech stropów do rozparcia obudowy w fazie tymczasowej. Długość całkowita ściany szczelinowej w analizowanym miejscu wynosi 30,50 m. W obliczeniach przyjęto fazowanie budowy analogicznie jak w obliczeniach stacji Nowy Świat – Uniwersytet, uwzględniając odpowiednio płytsze położenie stacji. Geometrię modelu oraz rzeczywiste, zweryfikowane podczas budowy, wa-

runki geotechniczne w wybranym do analizy przekroju przedstawiono na rys. 4.

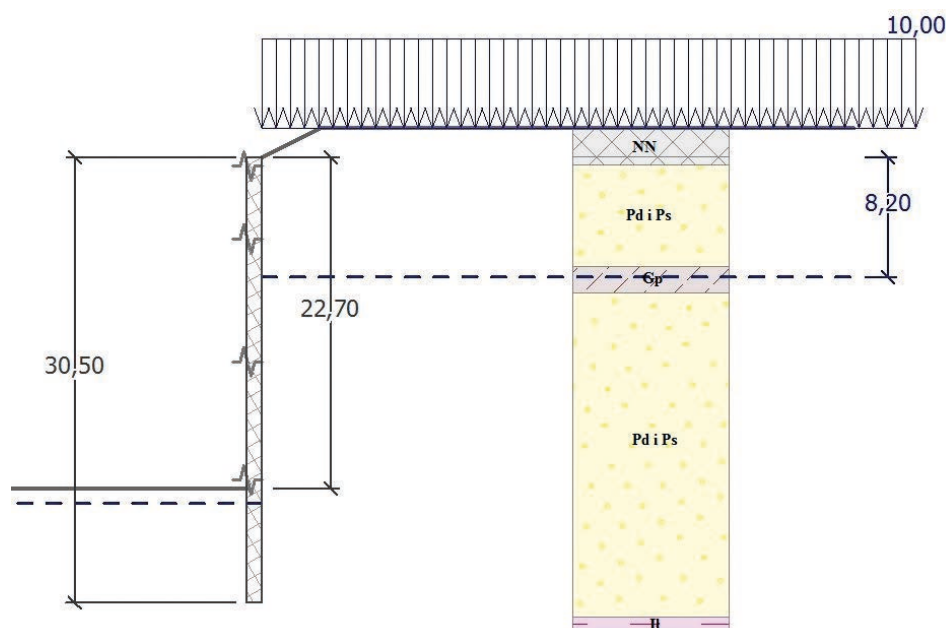
Przeprowadzone analizy statyczne obudowy wykopu w wybranej lokalizacji, z uwzględnieniem trzech zmian profilu gruntowego wprowadzanych podczas kolejnych etapów rozpoznania geotechnicznego, zaprezentowane szczegółowo w [3], świadczą o znaczącym wpływie dokładności rozpoznania na wyniki obliczeń. W wyniku analizy profili wykreślonych po pierwszych dwóch etapach badań geotechnicznych, przy założonej (ostatecznie także wykonanej) głębokości ściany szczelinowej, uzyskano nierealistyczne wartości momentów zginających w konstrukcji oraz brak utwierdzenia ściany pod dnem wykopu. W obliczeniach wykonanych z uwzględnieniem profilu gruntu potwierdzonego podczas budowy uzyskano zarówno realistyczne wartości sił wewnętrznych, jak i przemieszczeń ściany. Zestawienie przemieszczeń oraz momentów zginających uzyskanych z trzech kolejnych interpretacji profilu geotechnicznego przedstawiono w tabl. 3. Wyniki obliczeń ostatecznego profilu pokazano na rys. 5. Pomiary przemieszczeń ściany prowadzone w trakcie głębienia wykopu potwierdziły prawidłowość tej analizy.

PODSUMOWANIE

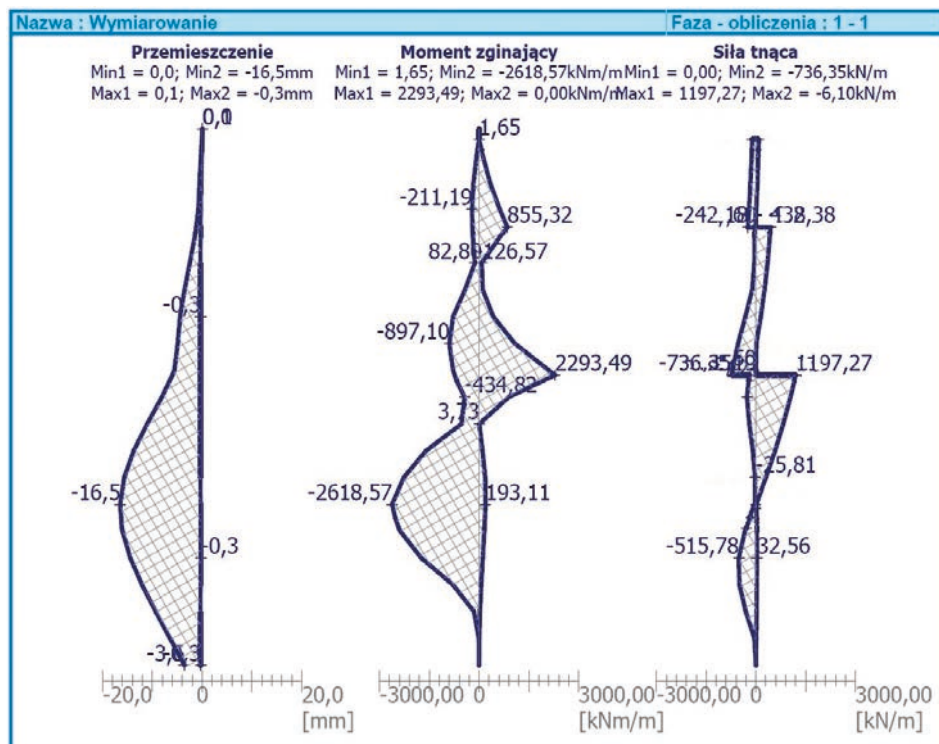
Na podstawie szeregu analiz numerycznych ścian wykopu, dwóch najgłębiej położonych stacji drugiej linii metra w Warszawie, zaprezentowano wpływ szczegółowości rozpoznania geotechnicznego na projektowanie tego rodzaju konstrukcji. W pierwszej kolejności pokazano wpływ doboru parametrów wydzielonych warstw gruntu (bez zmiany profilu) na wyniki

Tabl. 3. Wyniki obliczeń trzech interpretacji profilu geotechnicznego

	Profil 1		Profil 2		Profil 3	
	$u_{\max}$ [mm]	$M_{\max} / M_{\min}$ [kNm/m]	$u_{\max}$ [mm]	$M_{\max} / M_{\min}$ [kNm/m]	$u_{\max}$ [mm]	$M_{\max} / M_{\min}$ [kNm/m]
BH-1	546,7	3115 / 24120	548,9	3188 / 24179	16,5	2618 / 2293



Rys. 4. Geometria wykopu oraz warunki geotechniczne – stacja Świętokrzyska



Rys. 5. Obwiednie przemieszczeń i sił wewnętrznych, prawidłowy profil gruntu, stacja Świętokrzyska

obliczeń. Następnie, na drugim przykładzie, zaprezentowano jakościowe różnice w wynikach trzech obliczeń tego samego przekroju obliczeniowego uzyskanych na podstawie różnych profili gruntu opracowanych w kolejnych etapach rozpoznania podłoża gruntowego.

Analizując przedstawione przykłady, można stwierdzić, że projektowanie obudów głębokich wykopów z wykorzystaniem niepełnych, niedokładnych danych geotechnicznych podłoża (przestrzennego układu warstw i ich parametrów), pochodzących z różnych źródeł (norm, literatury, doświadczeń światowych), a nie z kompleksowo przeprowadzonego, szczegółowego rozpoznania geotechnicznego, prowadzi do otrzymywania nierealnych wyników zarówno obwiedni przemieszczeń teoretycznych, jak i momentów zginających. W konsekwencji projekt i wymiarowanie konstrukcji ściany mogą być błędne.

LITERATURA

1. Mitew-Czajewska M.: Niepewność warunków geotechnicznych w procesie budowlanym – na przykładzie budowy tunelu metra w Warszawie. Inżynieria i Budownictwo, nr 6/2014, 303-307.
2. Mitew-Czajewska M.: Numerical analysis of a 36 m deep diaphragm wall – parametric study. Proceedings of the 8th International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground (ISSMGE TC204). Seoul, Korea. CRC Press / Balkema, 2014, 257-262.
3. Mitew-Czajewska M.: Geotechnical investigation and static analysis of deep excavation walls – a case study of metro station construction in Warsaw. Annals of Warsaw University of Life Sciences, Land Reclamation (w druku), 2015.