

PRZEBUDOWA HALI WAGONOWNI W LESZNIE JAKO PRZYKŁAD REWITALIZACJI OBIEKTÓW KOLEJOWYCH

Rajmund Leszek Ignatowicz¹, Krzysztof Górski²,
Politechnika Wrońska¹, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu²

Streszczenie. W niniejszej pracy przedstawiono przykład przebudowy hali wagonowni (WGW), która znajduje się w Lesznie. Roboty budowlane obejmowały m.in. wykonanie i zaprojektowanie konstrukcji wsporczej pod urządzenia technologiczne w postaci komory żelbetowej. Modernizacja wagonowni dotyczyła rozwiązań konstrukcyjnych i materiałowych. Celem pracy jest również wykazanie wpływu zmian modułu sprężystości tworzywa grunto-cementowego (E) na zakres przemieszczeń palisady z pali wykonanej w technologii strumieniowo-iniekcyjnej. W pracy zilustrowano również wzmocnienie konstrukcji stalowej hali oraz opisano przyjęty model numeryczny do wymiarowania konstrukcji wsporczej – komory żelbetowej z elementami powłokowymi.

Słowa kluczowe: konstrukcja komory żelbetowej, model numeryczny MES, wagonownia kolejowa, zapadnia kolejowa

WSTĘP

Jednym z pozytywnych przykładów rewitalizacji niszczących obiektów kolejowych jest hala starej wagonowni w Lesznie. Jednostki taboru kolejowego, aby mogły spełniać swoje podstawowe zadania transportu osób, ich mienia lub towarów, powinny być obrządzane, sprawdzane pod względem zapewnienia codziennej bezawaryjnej pracy, kontrolowane w określonych odstępach czasu, ponadto należy zapewnić wykonanie niezbędnych napraw urządzeń oraz racjonalną eksploatację jednostek.

Poprzez obrządzanie rozumie się czyszczenie pojazdów trakcyjnych (wewnętrzne i zewnętrzne), dezynfekcję i dezynsekcję celem zapewnienia odpowiednich (zgodnych z obowiązującymi przepisami) warunków higieniczno-sanitarnych, ale również uzupełnianie urządzeń sanitarnych w środki czystości, takie jak: mydło, papier toaletowy, ręczniki papierowe, woda i inne materiały. Do obrządzania należy również oliwienie lub

odpowiednie smarowanie elementów wagonów lub lokomotyw, uzupełnianie wody oraz paliwa napędowego [Krzemieniecki 1976].

Obrządzanie, tj. bieżące utrzymywanie pojazdów (obejmujące kontrole codzienne lub okresowe wraz z naprawą mechanizmów czy instalacji elektrycznej, kanalizacyjnej i wodociągowej) oraz eksploatacja jednostek, odbywa się w wyspecjalizowanych sekcjach organizacji trakcji wyposażonych w odpowiednie stanowiska i urządzenia techniczne [Krzemieniecki 1976]. Najczęściej są to: lokomotywownie, elektrowozownie, motowozownie, a ponadto wagonownie, które w skrócie nazywane są WGW.

Wagonownie mają za zadanie utrzymywanie w należyтым stanie technicznym wagonów. Rozróżnia się wagonownie [Krzemieniecki 1976]: osobowe, towarowe i mieszane, do których zadań należy utrzymanie w odpowiednim stanie zarówno wagonów osobowych, jak i towarowych.

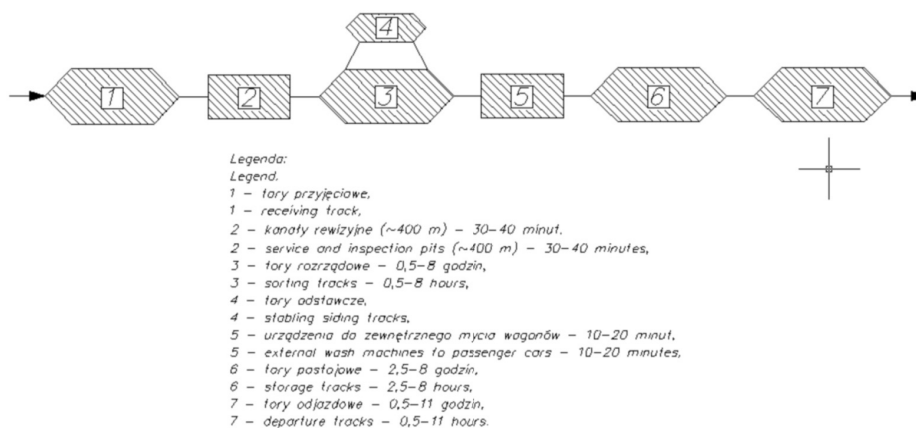
W przypadku wagonowni osobowej jest ona przystosowana nie tylko do działań mających zapewnić odpowiedni standard podróży pod względem warunków sanitarnych, ale również bezpieczeństwo jazdy, wobec czego ma za zadanie również usuwanie oblodzenia w okresie zimowym i ładowanie akumulatorów do oświetlenia elektrycznego. Kolejnymi czynnościami, które muszą być wykonane, zanim skład złożony z jednostki napędowej wraz z wagonami osobowymi wyruszy w trasę, jest podgrzewanie tych składów, rewizja i próby hamulców, a także przeglądy bieżące i okresowe. Należy do tego dodać także oględziny techniczne składów na stacjach [Krzemieniecki 1976].

Wracając jeszcze do zadań wykonywanych na terenie wagonowni osobowych związanych z czyszczeniem wagonów, warto wspomnieć, że oprócz zapewnienia podróżnym odpowiedniego komfortu jazdy, poprzez stworzenie komfortowych warunków jazdy, a także wymaganych warunków higieniczno-sanitarnych, przeprowadza się konserwację wagonów, przedłużając ich żywotność eksploatacyjną. Oczyszczone elementy, szczególnie podwozia, konserwuje się poprzez malowanie, smarowanie, kontroluje się ich stan [Neumann 1976]. Czyści się również materiał pokrycia siedzeń, a jeżeli występują drobne uszkodzenia, to można je łatwo i szybko naprawić. Estetyka wagonów pozwala również wykryć drobne pęknięcia zmęczeniowe materiału oraz właściwie przeprowadzić oględziny przez wyspecjalizowanych rewidentów [Neumann 1976].

Układ wagonowni osobowej jest przedstawiony na rysunku 1 [Krzemieniecki 1976, Neumann 1976]. Schemat układu torów, rozmieszczenia hal oraz urządzeń technicznych jest dostosowany do istniejących zoptymalizowanych rozwiązań technologii obrządzania i utrzymania składów pociągów [Krzemieniecki 1976].

Niezmiernie istotnymi elementami w procesie właściwego utrzymania taboru w należyтым stanie technicznym jest hala napraw wagonów, która znajduje się najczęściej przy torach rozrządowych.

Wagonownie przeznaczone dla wagonów towarowych mają podobne zadania jak wagonownie wagonów osobowych. Dodatkowo istnieje jeszcze możliwość dokonywania drobnych napraw w pociągach na stacjach kolejowych oraz napraw bieżących na wydzielonych torach stacyjnych. Bardzo ważne jest również czyszczenie i odkażanie wagonów: zwykle – przy przewożeniu zwierząt, lub obostrzone w przypadku na przykład zdiagnozowania choroby zakaźnej zwierzęcia lub jeżeli zwierzę padło podczas transportu [Krzemieniecki 1976, Neumann 1976].



Rys. 1. Schemat stacji postojowej wagonowni osobowej [Krzemieński 1976, Neumann 1976]
Fig. 1. Diagram of a railway depot with a demurrage station [Krzemieński 1976, Neumann 1976]

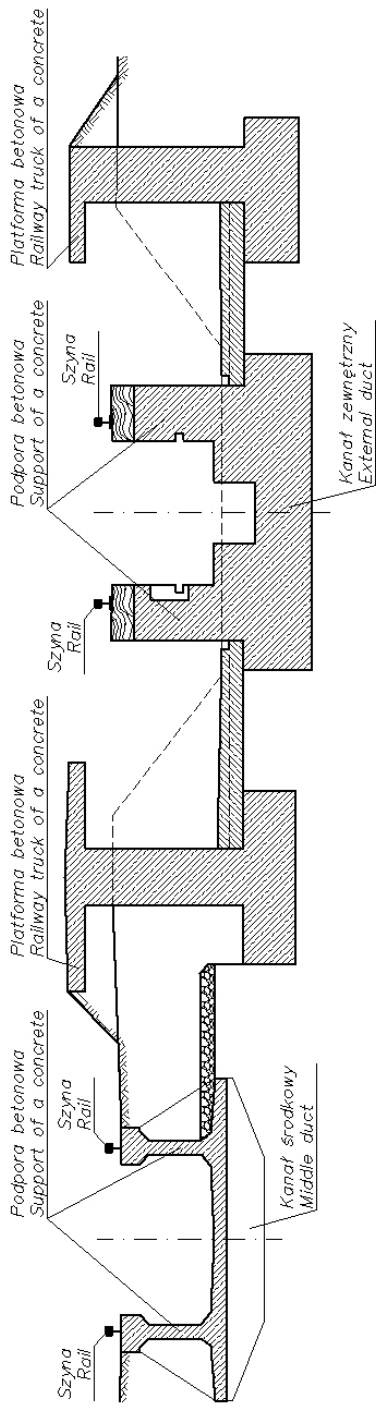
Każda wagonownia lub lokomotywnia powinna mieć na swoim wyposażeniu zapadnię zestawów kołowych. Zapadnia to urządzenie pozwalające opuszczać uszkodzone wózki lub zestawy kołowe, bez konieczności podnoszenia taboru kolejowego, a następnie przesunięcie ich poziomo w poprzek osi toru. Operacja opuszczania i przemieszczania poziomego odbywa się w kanale pod powierzchnią podłogi wagonu, na samym końcu wydobywa się niesprawny element, ustawiając na sąsiednim torze warsztatowym, skąd może być zabrany do dalszej naprawy [Krzemieński 1976].

Przekrój przykładowego kanału rewizyjnego wagonowni kolejowej został przedstawiony na rysunku 2 [Krzemieński 1976], a przykłady rozwiązań hali postojowej do obrządzania oraz hali napraw wraz z lokalizacją zapadni kolejowej – na rysunku 3 [Neumann 1976] i rysunku 4 [Krzemieński 1976].

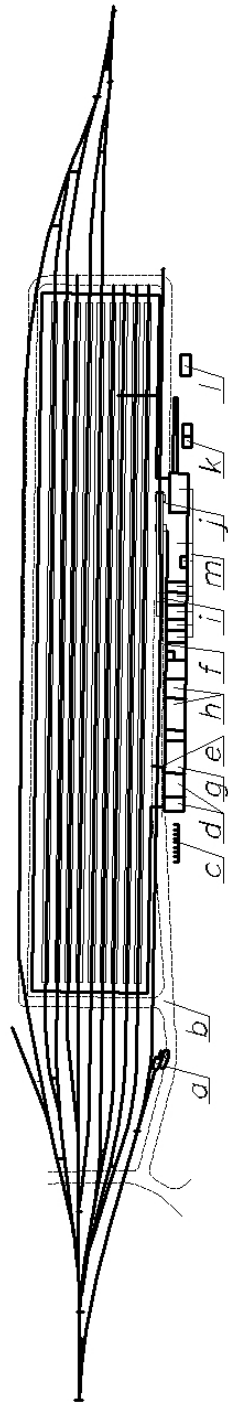
W przypadku istniejących obiektów budowlanych, które wymagają remontów kapitalnych lub przebudowy dla innych celów, należy bardzo często wzmacniać podłoże gruntowe i fundamenty. Metodami stabilizacji podłoża (w ogólnym ujęciu, bez wyróżniania możliwości zastosowania do konkretnych budowli i obiektów budowlanych) są na przykład: wymiana gruntu, zagęszczanie vibracyjne, zagęszczanie dynamiczne, ciężkie zagęszczanie dynamiczne, wymiana dynamiczna, kolumny CMC, konsolidacja próżniowa, wysokociśnieniowa iniekcja strumieniowa (*jet grouting*), drenaż pionowy i mikro-wybuchy.

Modernizacja hali wagonowni PKP w Lesznie, w której została zamontowana zapadnia kolejowa służąca do naprawy i regeneracji zestawów kołowych taboru kolejowego, wymagała stabilizacji wykopu pod komorę żelbetową zapadni, co zostało osiągnięte poprzez wykonanie palisady z kolumn *jet grouting*. Zabezpieczenie stateczności ścian wykopu pozwoliło na bezpośrednią realizację konstrukcji wsporczej pod urządzenia technologiczne zapadni w postaci płyty żelbetowej dna oraz ścian żelbetowych komory połączonych belką oczepową z uprzednio uformowanymi palami *jet grouting*.

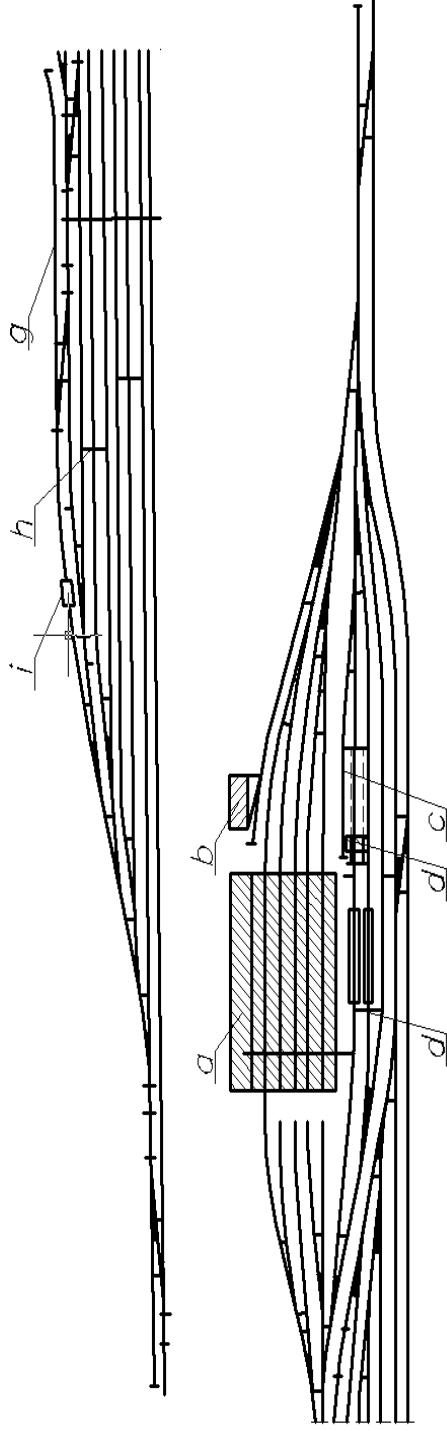
Projekt obejmował tylko rozwiązania konstrukcyjne i materiałowe, natomiast nie dotyczył konstrukcji urządzeń i innych instalacji technicznych.



Rys. 2. Kanały rewizyjne stosowane w halach warsztatowych wagonowni kolejowych [Krzemieniecki 1976]
 Fig. 2. A service and inspection pits into railway workshops are given [Krzemieniecki 1976]



Rys. 3. Hala postojowa do obrządzania i naprawy wagonów osobowych [Neumann 1976]: a – rampa dojazdowa, b – droga dojazdowa, c – zasiłek na złom, d – warsztat, e – zapadnia, f – tor dojazdowy, g – malarnia, h – magazyn, i – tor naprawczy, j – dźwignice Kuttrufa, k – acetylenownia, l – magazyn drewna, m – warsztat mechaniczny
 Diagram of a railway workshops to handle and repair passenger cars [Neumann 1976]: a – loading platform, b – access road, c – scrap bunker, d – repair shop, e – wheel drop pit, f – railroad access track, g – paint shop, h – storeroom, i – repair railway track, j – Kuttruf's crane, k – acetylation shop, l – wood store, m – mechanical shop



Rys. 4. Schemat hali naprawczej i układ torów wagonowni towarowej [Krzemieniecki 1976]: a – hala warsztatowa, b – magazyn, c – tory do załadunku zestawów kołowych, d – dźwig do załadunku zestawów kołowych, e – tory naprawcze, f – tory odbiorcze i zapasowe, g – tory zdawcze, h – tor dla wagonów oczekujących na części zamienne, i – waga wagonowa

Fig. 4. Diagram of a repair workshops and arrangement tracks of railway workshops [Krzemieniecki 1976]: a – hall of the railway workshop, b – store, c – crane track to loading of the wheel sets, d – crane to loading of the wheel sets, e – repair railway tracks, f – receiving and sparring railway tracks, g – delivery tracks, h – storage track for rail cars to wait for spare parts, i – railweighbridge

Odnosnie technologii *jet groutin*, należy zaznaczyć, iż metoda ta – wysokociśnieniowej iniekcji strumieniowej – została po raz pierwszy zastosowana w Japonii na początku lat siedemdziesiątych XX wieku i polega na wprowadzeniu iniektu do gruntu pod dużym ciśnieniem, które może wynosić od 15 do 70 MPa [Rawicki i Motak 1996]. Iniekty najczęściej oparte są na bazie zaczynów cementowych. Duża prędkość (około $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) oraz energia wypływu iniektu z dysz iniekcyjnych powoduje niszczenie naturalnej struktury gruntu poprzez odpajanie i mieszanie cząstek gruntu z iniektem, ponadto proces obrotu żerdzi, przez którą pompowany jest zaczyn cementowy do gruntu, oraz jej stopniowe podnoszenie pozwalają na uformowanie pala [Gwizdała i Kościk 2007]. Stwardniała mieszanina gruntowo-cementowa stanowi materiał konstrukcyjny pala i może charakteryzować się zróżnicowanymi własnościami fizycznymi i mechanicznymi [Rawicki i Motak 1996, Rawicki i Żmudziński 1998].

Zakres możliwości wykorzystania iniekcji strumieniowej w celach inżynierskich jest bardzo szeroki, o czym wspominają Gwizdała i Kościk [2007], przywołując następujące przykłady:

- zabezpieczanie posadowienia budynków w sąsiedztwie głębokich wykopów,
- formowanie tymczasowych obudów tuneli,
- zabezpieczanie budynków podczas budowy tuneli metra,
- stabilizacja osuwisk,
- formowania kotew,
- wykonywanie szczelnych ekranów wokół składowisk odpadów i budowli wodnych,
- uszczelnianie wałów przeciwpowodziowych,
- wzmacnianie podłoża pod nasypy drogowe i kolejowe, nawierzchnie lotniskowe oraz fundamenty podpór obiektów mostowych,
- pogłębianie fundamentów (piwnic) istniejących budynków,
- uszczelnianie dna wykopów,
- zabezpieczanie filarów i przyczółków obiektów drogowych oraz hydrotechnicznych przed erozją,
- formowanie iniekcyjnych pali fundamentowych różnych średnic pod nowo wznoszone objekty,
- wzmacnianie istniejących fundamentów obiektów zabytkowych.

Metoda *jet grouting* chętnie jest stosowana do posadowienia pośredniego fundamentów, gdyż pod względem tempa i kosztów realizacji prac może konkurować z innymi technologiami posadowienia na palach. Analogiczny wniosek nasuwa się również w zakresie prac wymagających wzmocnienia podłoża gruntowego, w szczególności dotyczy to poprawy parametrów geotechnicznych ośrodka, takich jak: kąt tarcia wewnętrznego, spójność i moduł odkształcenia. Kolumny iniekcji strumieniowej w palisadach lub przeznaczone pod fundamenty nowych obiektów mogą być dodatkowo zbrojone kształtownikami stalowymi lub rurami stalowymi i osiągać znaczne wartości nośności i wytrzymałości na zginanie, a ponadto mogą być przeznaczone do przenoszenia sił zarówno wrywających, jak i wciskających [Gwizdała i Kościk 2007].

W przypadku kolumn formowanych w technologii *jet grouting* niezmiernie istotne jest aby określić następujące dane i informacje niezbędne do właściwego zaprojektowania (pod względem warunków stanów granicznych nośności i użyteczności), a potem wykonawstwa robót [PN-EN 12716:2002]:

- szczegółowy opis profilu gruntu i jego właściwości geotechnicznych w obrębie przewidywanego zasięgu robót oraz w miarę potrzeby:
- warunki hydrogeologiczne,
- ograniczenia zewnętrzne (istniejące przyległe konstrukcje, konstrukcje i instalacje podziemne, napowietrzne linie energetyczne i ograniczenia robót, dostępność terenu),
- wymagania środowiskowe, w szczególności składowanie urobku,
- dopuszczalne odkształcenia konstrukcji wzmacnianych lub konstrukcji przyległych.

Ponadto zaleca się stosować zaczyny cementowe o współczynniku wagowym w/c w granicach 0,5–1,5 [PN-EN 12716:2002], choć w literaturze spotyka się również realizacje posadowienia obiektów budowlanych z wykorzystaniem formowania tworzywa gruntowo-cementowego przy użyciu zaczynu o wartości $w/c = 2$ [Gwizdała i Kościak 2007].

STAN TECHNICZNY OBIEKTU PRZED REMONTEM ORAZ WARUNKI GRUNTOWO-WODNE

Budynek wagonowni zlokalizowany na terenie Leszna znajdował się w złym stanie technicznym, co jest uwidocznione na zdjęciu (rys. 5a). Istniejąca hala wymagała wymiany posadzki na gruncie. Konstrukcja stalowa hali ze względu na likwidację jednej podpory i zastąpienie jej dwoma ukośnymi zastrzałami wymagała wzmocnienia, analogicznie jak więzary kratownicowe podtrzymujące pokrycie dachowe. Jednocześnie w obrębie lokalizacji zapadni wymagana była likwidacja słupa nośnego konstrukcji hali kolidującego z komorą żelbetową, a obciążenie przypadające na słup zostało przeniesione poprzez ukośne zastrzały rurowe stalowe na sąsiednie słupy nośne i fundamenty (rys. 14 i 15). Do wymiany była cała stolarka okienna, ponadto należało wykonać odnowienie ścian w postaci robót tynkarskich i malarskich.

Pod projektowaną konstrukcją komory zapadni wykonano 4 otwory geologiczne na głębokość około 8,0 m. Na podstawie badań stwierdzono następujące warstwy geologiczne:

- warstwa nB o miąższości 0,85 m, $I_D = 0,61$,
- warstwa Pd/Ps o miąższości 1,10 m, $I_D = 0,69$,
- warstwa Ps(+Ż) o miąższości 1,40 m, $I_D = 0,53$,
- warstwa Gp o miąższości 0,80 m, $I_L = 0,40$,
- warstwa Pg/Ps o miąższości 2,30 m, $I_L = 0,35$,
- warstwa Pg/Ps o miąższości 1,20 m, $I_L = 0,00$,
- warstwa Ps o nieokreślonej miąższości i $I_D = 0,50$, w której stwierdzono występowanie wody gruntowej o napiętym zwierciadle cieczy (rzędna nawiercenia 7,65 m p.p.t., rzędna ustabilizowanego poziomu wody 6,45 m p.p.t.).

Poziom posadowienia płyty fundamentowej został zaprojektowany na rzędnej $-4,50$ m p.p.t., tj. w warstwie gruntów Pg/Ps o $I_L = 0,35$.

Na podstawie otrzymanych wyników badań geologicznych, jak również lokalizacji projektowanej komory i warunków wynikających z procesu technologicznego zaprojektowano posadowienie bezpośrednie na wymienionej warstwie gruntów spoistych wraz z umocnieniem ścian wykopu kolumnami gruntowo-cementowymi metodą *jet grouting*.

a



b



Rys. 5. Stan techniczny hali: a – przed remontem, b – po przebudowie (fot. R.L. Ignatowicz)
 Fig. 5. Hall of railway workshop: a – before the general overhaul, b – after (photo R.L. Ignatowicz)

W niniejszej pracy wykorzystano wartość zróżnicowania cechy zmienności współczynnika sprężystości (E) dla tworzywa gruntowo-cementowego kolumn *jet grouting*, jaką uzyskali Rawicki i Żmudziński [1998] na podstawie badań 15 próbek. Pale iniekcji wysokociśnieniowej, z których pobrano próbki rdzeniowe do badań, stanowiły wzmocnienie posadowienia fundamentów hali i estakady w okolicach Krakowa. Wartość współczynnika zmienności (ν) dla modułu sprężystości (E) wynosiła ogólnie dla wszystkich pali: $\nu = 27,7\%$, przy odchyleniu standardowym $s = 0,735$ GPa oraz średniej wartości modułu sprężystości równej $E = 2,86$ GPa. Należy podkreślić, iż wszystkie kolumny, o średniej długości 10 i 11 m, zostały zrealizowane przy podawaniu zaczynu cementowego do iniekcji strumieniowej o stosunku $c/w = 1,2$. Podłoże gruntowe stanowiły nasypy pylasto-gliniaste (miąższość 4,1 m), osady lessopodobne (miąższość 8,6 m), na które w górnej części składały się pyły twardoplastyczne ($Il = 0,16$), a w części dolnej gliny pylaste twardoplastyczne ($Il = 0,24$). Poniżej tych warstw zalegały piaski wilgotne o miąższości około 1,7 m, a następnie kolejno: gliny pylaste i piaszczyste oraz gliny zwięzłe o uśrednionej wartości stopnia plastyczności ($Il = 0,16$). Miarę zróżnicowania rozkładu cechy współczynnika sprężystości (E) dla poszczególnych pali *jet grouting* analizowanych osobno prezentuje tabela 1 na podstawie badań [Rawicki i Żmudziński 1998].

Trochę inne wnioski odnośnie do wpływu rodzaju gruntu wchodzącego w skład tworzywa gruntowo-cementowego sformułowała Bzówka [2003] na podstawie badań wytrzymałościowych próbek walcowych, o stosunku wysokości próbki (h) do średnicy (d) równym 2 : 1, wyciętych z pala strumieniowo-iniekcyjnego. W pracy tej zostały wyróżnione serie próbek, które obejmowały:

Tabela 1. Średnie wartości współczynnika sprężystości (E), odchylenia standardowego (s) oraz współczynnika zmienności (v) dla tworzywa gruntowo-cementowego z badań według Rawickiego i Żmudzińskiego [1998]

Table 1. Mean values of the coefficient of direct elasticity (E), standard deviation (s), and the coefficient of variation (v) for plastic soil-cement of the tests by Rawicki and Żmudziński [1998]

Numer pala iniekcynego Number of a jet grouting pile	Średnie wartości współczynnika sprężystości Mean values of the coefficient of direct elasticity E [GPa]	Odchylenie standardowe Standard deviation s [-]	Współczynnik zmienności Coefficient of variation v [%]
1H	3,3	1,1521	34,4
2H	3,4	1,1942	35,1
3E	2,9	0,2754	9,6
4E	2,3	0,6267	27,0

- serię A, próbki wycięte z części kolumny, której składnikiem gruntowym tworzywa iniekcynego był piasek średni,
- serię B, próbki do badań zostały pobrane z części pala strumieniowo-iniekcynego, utworzonego poprzez zmieszanie zaczynu cementowego ze składnikiem gruntowym: piasek średni/ił pylasty,
- serie C, D, E, próbki przeznaczone do badań wytrzymałościowych zostały uzyskane z części kolumny *jet grouting*, której składnikiem był ił pylasty w tworzywie gruntowo-cementowym.

W tabeli 2 przedstawiono wyniki badań parametrów z pracy Bzówki [2003], zarówno jednoosiowego, jak i trójosiowego ściskania. Na podstawie wyników eksperymentalnych autorka artykułu stwierdziła, iż wpływ rodzaju gruntu na parametry modelu Coulomba-Mohra dla pali uformowanych metodą strumieniowo-iniekcyną jest „nieduży, jednak niemniej widoczny”. Niezmiernie istotnym wnioskiem, sformułowanym w artykule jest

Tabela 2. Średnie wartości parametrów współczynnika sprężystości (E), kąta tarcia wewnętrznego (ϕ), współczynnika Poissona (ν) i kohezji (c) dla tworzywa gruntowo-cementowego z badań Bzówki [2003]

Table 2. Mean values of the coefficient of direct elasticity (E), friction angle (ϕ), Poisson's ratio (ν) and the cohesion (c) for plastic soil-cement of the tests referred by Bzówka [2003]

Numer serii pala strumieniowo-iniekcynego Number of series of a jet grouting pile	Średnie wartości współczynnika sprężystości Mean values of the coefficient of direct elasticity E [MPa]	Kąt tarcia wewnętrznego Friction angle ϕ [°]	Współczynnik Poissona Poisson's ratio ν [-]	Spójność Kohezji c [kPa]
Serie A i B Series A and B	5630	56	0,17	3640
Serie C, D i E Series C, D and E	4720	52	0,20	3530
Serie A–E Series A–E	5490	57	0,18	3320

stwierdzenie, że sztywność tworzywa grunto-cementowego jest od 5 do 8 razy mniejsza niż sztywności betonu, jeśli miarą będzie moduł sprężystości (E).

W niniejszej pracy przyjęto, iż obliczenia statyczno-wytrzymałościowe komory żelbetowej, a następnie jej wymiarowanie zostaną przeprowadzone na podstawie trzech wartości współczynników sprężystości podłużnej (E) dla tworzywa grunto-cementowego, których wielkości uzależniono od maksymalnego współczynnika zmienności (ν) podanego w tabeli 1, po zaokrągleniu do pełnych jednośc. Ponieważ maksymalna wartość współczynnika zmienności dla tworzywa grunto-cementowego jest równa $\nu = 35\%$, więc przy średniej wartości współczynnika sprężystości $E = 3,2$ GPa przyjętej do obliczeń numerycznych uzyskuje się przedział zmienności parametru E w granicach od 1,92 do 4,48 GPa.

Głębokość komory zdeterminowała następującą technologię przygotowania podłoża i wykopu:

- wykonanie wzmocnienia konstrukcji stalowej hali w obszarze oddziaływania prowadzonych robót budowlanych,
- wykonanie po obrysie komory wzmocnienia ścian wykopu metodą *jet grouting* wraz z podbiciem istniejących fundamentów hali w strefie przylegającej do komory,
- wykonanie wykopu do poziomu posadowienia płyty dennej komory zapadni i następnie jego pogłębienie do poziomu spągu poduszki z warstwy tłucznia otoczonego geotkaniną separacyjną, której zadaniem jest wzmocnienie podłoża gruntowego, z jednoczesnym zachowaniem stateczności dna wykopu z uwagi na napięte zwierciadło wody gruntowej.

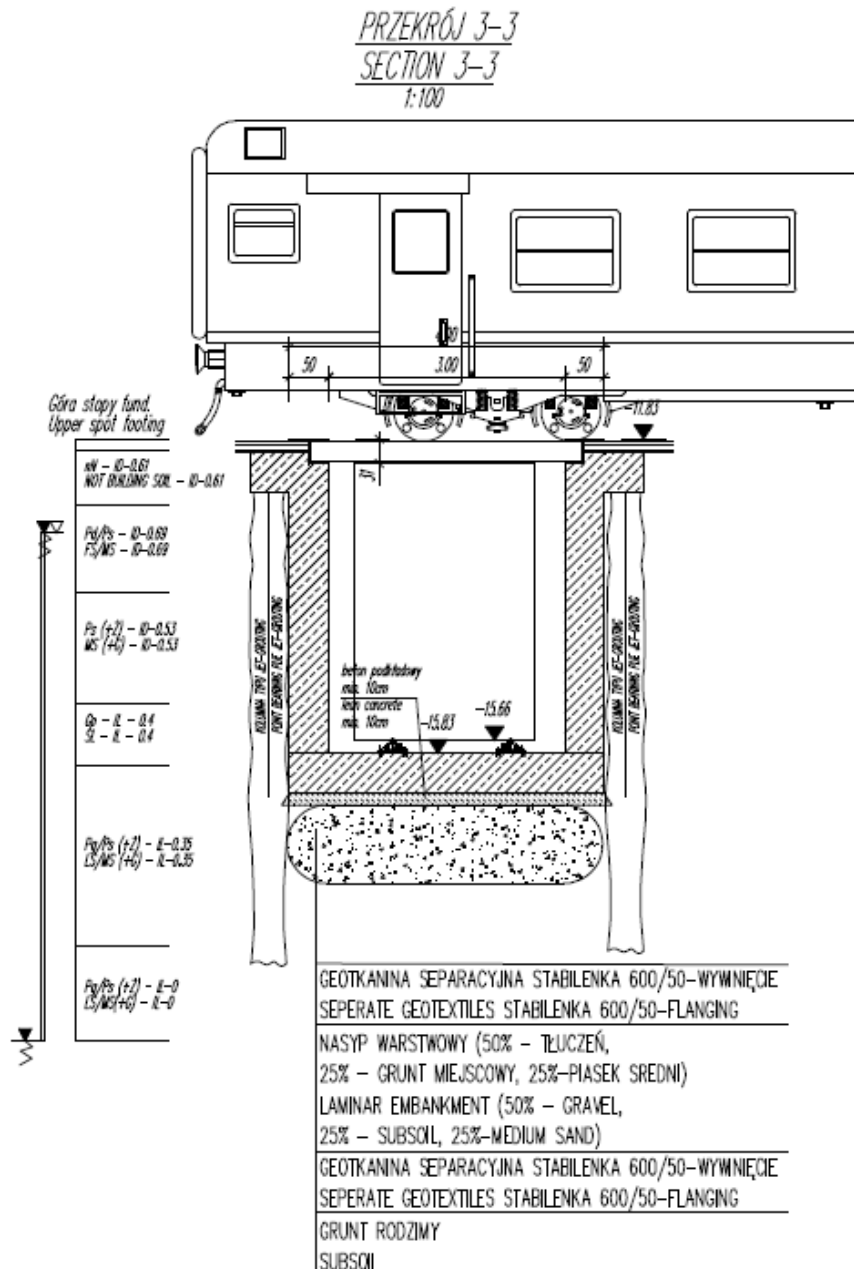
PARAMETRY TECHNICZNE

Konstrukcję komory zapadni zaprojektowano jako monolityczną żelbetową z betonu C30/37, $w/c < 0,45$, zbrojonego stalą AIIIIN-RB500W. Z uwagi na skomplikowaną lokalizację, jak również trudne warunki gruntowe zaprojektowano w pierwszym etapie zabezpieczenie ścian wykopu palisadą z grunto-cementu, formowaną po obrysie komory. Po przegłębieniu komory do poziomu posadowienia należało wymienić podłoże na nasyp budowlany z piasku stabilizowanego cementem, ponieważ stanowił on element korka zabezpieczającego przed napiętym zwierciadłem wody. Na czas wymiany gruntu zastosowano igłostudnie w celu zdjęcia napiętego zwierciadła wody, nie odwadniając przy tym warstwy piasków.

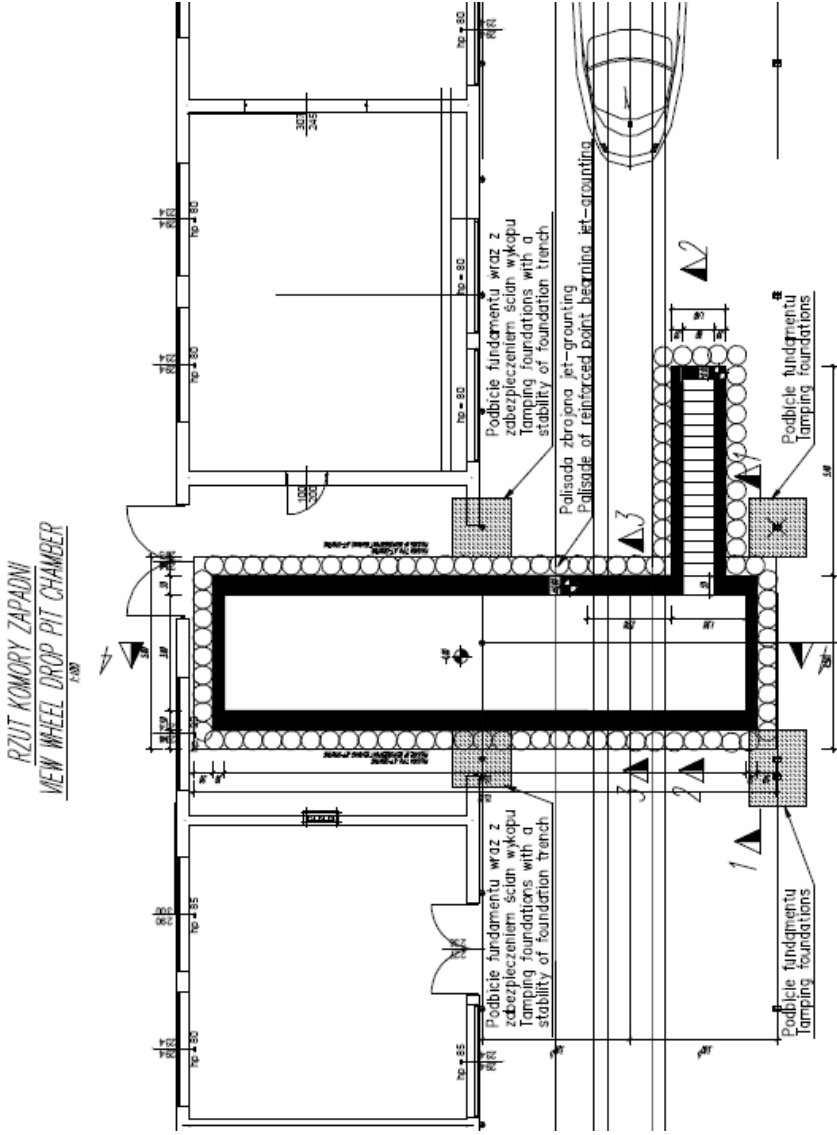
Zaprojektowano zwieńczenie korony komory belką oczepową o wymiarach 50×100 cm, zawieszoną na wykonanej wcześniej palisadzie *jet grouting* o szerokości pali wynoszącej około 1 m. Takie rozwiązanie zabezpiecza przed nadmiernym osiadaniem zapadni.

Parametry komory zasadniczej wynoszą:

- długość: 14,11 m, ściany podłużne grubości 50 cm,
 - szerokość: 4,00 m, ściany poprzeczne grubości 30 cm,
 - głębokość: 4,00 m, płyta fundamentowa grubości 50 cm.
- Projekt komory zapadni przedstawiono na rysunkach 6, 7 i 8.



Rys. 6. Przekroje pionowe przez zaprojektowaną komorę (według numeracji przekrojów na rys. 7)
Fig. 6. Vertical sections for reinforced concrete chamber (according to sections on Fig. 7)



Rys. 7. Rzut z góry komory żelbetowej zapadni
Fig. 7. Top view of a reinforced concrete chamber

MODEL NUMERYCZNY I ZAŁOŻENIA WYJŚCIOWE DO OBLICZEŃ KOMORY ŻELBETOWEJ ZAPADNI

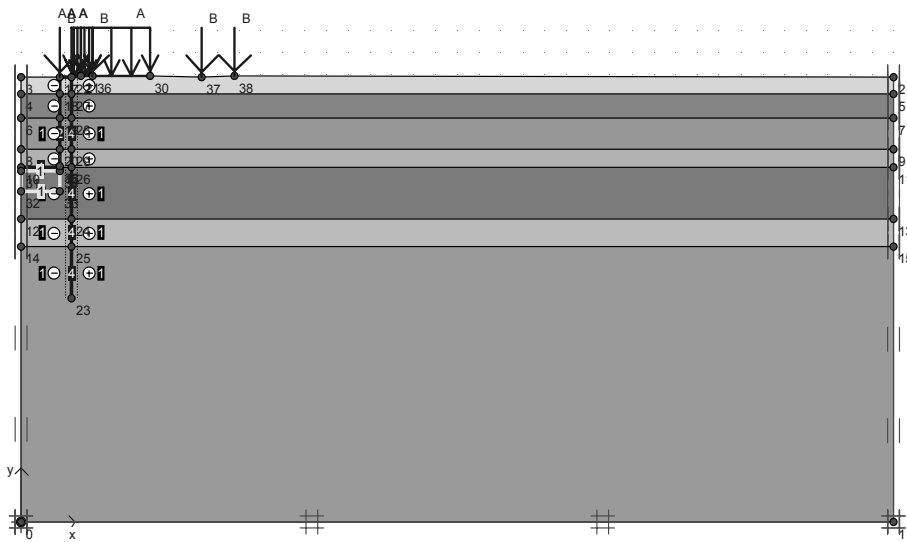
Obliczenia wstępne przeprowadzono w programie komercyjnym Plaxis v.8.2, bazującym na metodzie elementów skończonych. W programie tym został przygotowany model numeryczny obejmujący 11 etapów realizacji komory żelbetowej zapadni i palisady z pali *jet grouting*, której zadaniem jest zapewnienie stateczności wykopu. Ponadto w obliczeniach został uwzględniony wpływ zmiany parametrów modułu sprężystości (E) kolumn strumieniowo-iniekcyjnych palisady na ugięcia, parcia gruntu i stan wyężenia konstrukcji komory zapadni (patrz rozdz. Stan techniczny obiektu przed remontem oraz warunki gruntowo-wodne). Przygotowano cztery warianty obliczeń numerycznych, przyjmując różne wartości modułu sprężystości: $E_1 = 1,92$ GPa, $E_2 = 3,20$ GPa, $E_3 = 4,48$ GPa i dodatkowy wariant dla $E_d = 5,49$ GPa, uzyskanej średniej wartości dla pala *jet grouting* z badań Bzówki [2003]. Obciążenia w przyjętym modelu podzielono na obciążenia: $A = 15$ kPa, pozwalające określić wyężenie konstrukcji w czasie wykonywania komory, i $B = 250$ kN na oś, które oznaczają obciążenia eksploatacyjne podczas normalnej pracy w wagonowni kolejowej, przypadające od taboru kolejowego. Obliczenia zostały wykonane przy przyjęciu pracy konstrukcji komory w płaskim stanie odkształcenia. Obszar podzielono na 1366 elementów 15-węzłowych, co dawało razem 11 223 węzłów, a liczba punktów naprężenia wynosiła 16 392. Średni wymiar elementu wynosił 0,76 m. Dla warstw gruntowych przyjęto niestowarzyszony model sprężysto-plastyczny z warunkiem plastyczności Coulomba-Mohra, natomiast dla komory żelbetowej zapadni oraz pali *jet grouting* model materiału jest liniowo sprężysty.

Charakterystyczne wartości parametrów warstw gruntowych podano w tabeli 3, a przygotowany model numeryczny w programie Plaxis v.8.2 przedstawiono na rysunku 9.

W następnym etapie przeprowadzono już zasadnicze obliczenia statyczno-wytrzymałościowe komory zapadni, wykonane metodą elementów skończonych, których zadaniem

Tabela 3. Parametry gruntowe przyjęte do obliczeń numerycznych
Table 3. A soil parameters for the numerical computation

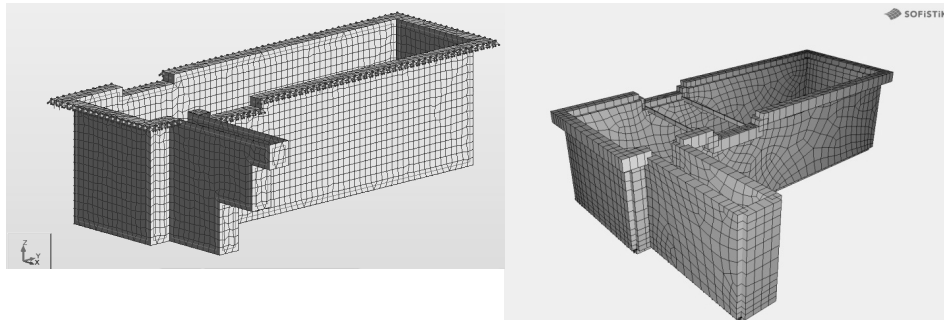
Nr warstwy Number soil	Oznaczenie warstwy Label layer of a soil	Moduł odkształcenia Modulus of elasticity E [kPa]	Spójność Kohesion c [kPa]	Współczynnik Poissona Poisson's ratio ν [-]	Kąt tarcia wewnętrznego Friction angle ϕ [°]
1	nN – grunt niebudowlany	8000	5	0,3	5
2	Gp ($I_L = 0,4$)	18 000	24	0,22	14,5
3	Pd/Ps ($I_D = 0,69$)	62 000	1	0,23	31,5
4	Ps (+Ż) ($I_D = 0,53$)	84 000	1	0,25	33
5	Pg/Ps (+Ż) ($I_L = 0,35$)	27 000	33	0,21	19
6	Pg/Ps (+Ż) ($I_L = 0,00$)	68 000	49	0,15	25
7	Ps ($I_D = 0,50$)	80 000	1	0,25	33
8	Materac	85 000	1	0,23	34,5



Rys. 9. Model numeryczny komory żelbetowej zapadni wraz z palisadą z kolumn strumieniowo-iniekcyjnych oraz warstwy gruntowe w Plaxis v.8.2 – etap 1

Fig. 9. Numerical model of reinforced concrete chamber with jet grouting palisade and soil layers in program the Plaxis v.8.2 – stage 1

było określenie sił wewnętrznych w komorze zapadni oraz niezbędnego zbrojenia ścian i płyty dennej. Model numeryczny komory został przygotowany w dwóch programach: Robot Structural Analysis v.12 i Sofistik v.23 (key: 5557-001), przy czym obliczenia przeprowadzono w dwóch wariantach. Oba warianty obejmowały zamodelowanie siatki elementów ścian i dna komory za pomocą powłokowych elementów skończonych 4-węzłowych, wygenerowanych na 16 i 31 panelach. Pierwsza siatka MES miała 866 węzłów, tj. 846 elementów skończonych, natomiast w drugiej siatce wygenerowano 4157 węzłów i 4128 elementów (rys. 10). Każdy powłokowy element skończony jest opisany przez



Rys. 10. Modele numeryczne komory żelbetowej zapadni w programach: a – Robot Structural Analysis v.12, b – Sofistik

Fig. 10. Numerical models of reinforced concrete chamber in programs: a – the Robot Structural Analysis v.12, b – the Sofistik

24 stopnie swobody (po 6 stopni przypadających na węzeł), zatem ogólna liczba statycznych stopni swobody dla wariantu drugiego modelu komory zapadni wynosiła 24 789.

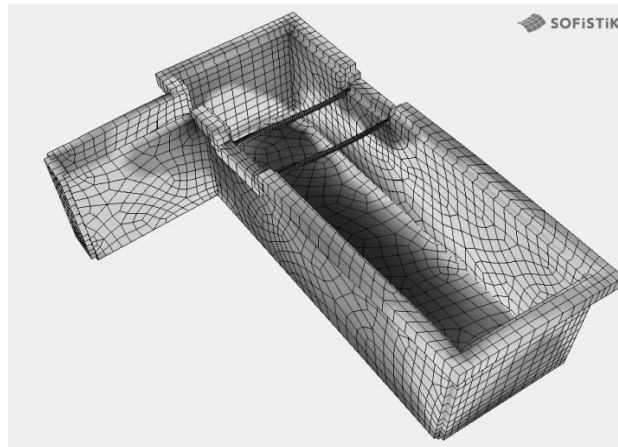
Uzupełniając informację o siatce modelu numerycznego, należy jeszcze dodać, iż średni wymiar oczka siatki, tj. elementu skończonego w wariantcie pierwszym, wynosił $0,5 \times 0,5$ m, natomiast w przypadku drugiego wariantu – $0,25 \times 0,25$ m. Do obliczeń i wymiarowania konstrukcji przyjęto model liniowo sprężysty dla materiału ścian i dna komory.

Obciążenia analizowanych modeli komory obejmowały: ciężar własny konstrukcji, obciążenia użytkowe (eksploatacyjne), obciążenia technologiczne i parcie gruntu.

Do obliczeń numerycznych przyjęto następujące dane wyjściowe i obciążenia:

- obciążenia krawędzi ściany zapadni lokomotywą: 250 kN na oś,
- obciążenia na konstrukcję dachu hali wagonowni od obciążenia śniegiem przyjęto dla Leszna: strefa 2 (według PN-80/B-02010/Az1:2006),
- obciążenia technologiczne: $1,5 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$,
- klasa ekspozycji XA2: środowisko chemiczne średnioagresywne,
- dopuszczalna rysa: $wk < 0,1$ mm – od strony wody, $wk < 0,30$ mm – od strony zewnętrznej,
- klasa betonu C30/37 (na bazie cementu siarczanoodpornego, nasiąkliwość $< 5\%$, według PN-EN-1917:2004),
- stopień wodoszczelności betonu W8 i współczynnik wodno-cementowy $w/c < 0,45$,
- stal zbrojeniowa AIIIIN (RB500W).

Przykładem uzyskanych wyników obliczeń numerycznych za pomocą systemu Sofistik jest rysunek 11, który ilustruje strefy odkształceń całkowitych komory żelbetowej zapadni.

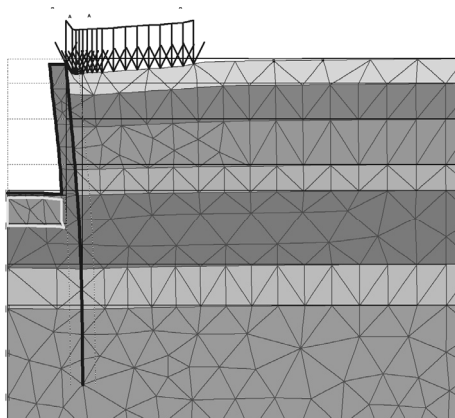


Rys. 11. Odkształcenia całkowite komory zapadni uzyskane na podstawie obliczeń numerycznych

Fig. 11. Total deformations of numerical solutions for the reinforced concrete chamber

WYNIKI OBLICZEŃ I PRZYJĘTE ROZWIĄZANIA KONSTRUKCYJNE

Przykład deformacji siatki elementów skończonych dla etapu 11 – eksploatacja obiektu, przy dwudziestokrotnym powiększeniu, został zilustrowany na rysunku 12.



Rys. 12. Deformacja siatki elementów skończonych dla etapu 11 (wariant 1) przy dwudziestokrotnym powiększeniu

Fig. 12. Deformed mesh of FEM for 11 stage (variant 1) with a magnification of about 20 times

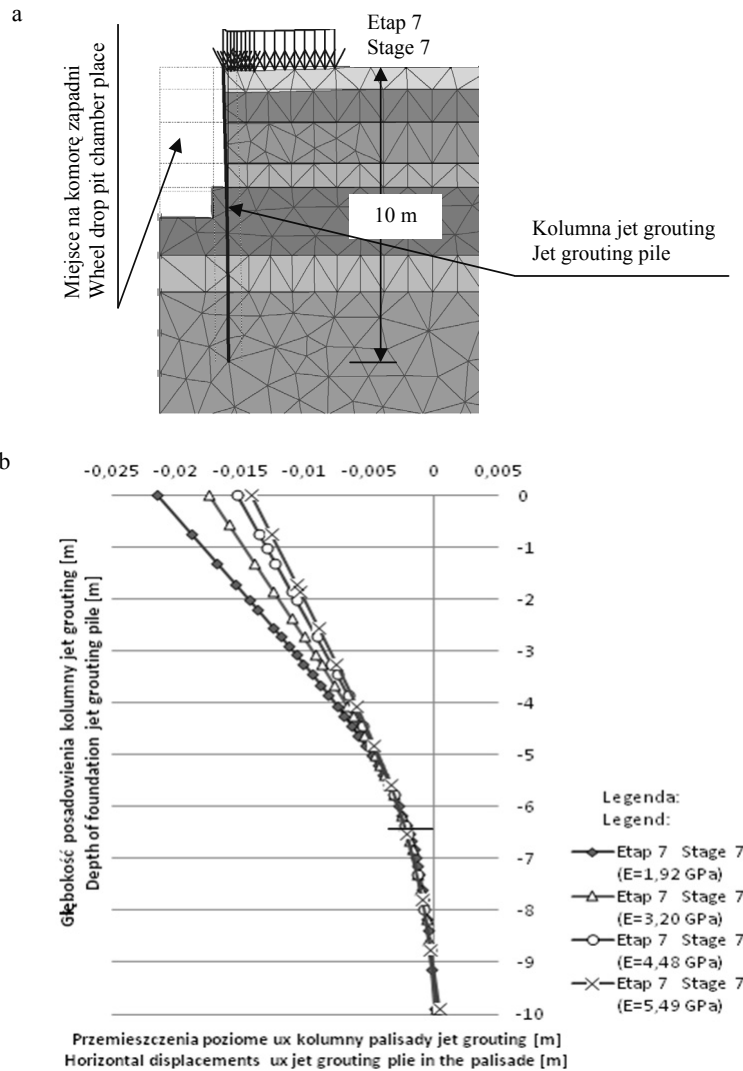
Uzyskane rezultaty przemieszczeń posłużyły do kalibracji modelu konstrukcji zapadni kolejowej w programach Robot oraz Sofistic. Wyniki obliczeń przemieszczeń poziomych palisady dla etapu 7 prezentuje rysunek 13.

Na podstawie rysunku 13 można stwierdzić, iż zmiana modułu sprężystości w analizowanym zakresie $E = 1,92\text{--}5,49$ GPa dla tworzywa cementogrunтового nie wpływa istotnie na wielkość uzyskanych deformacji poziomych zarówno ściany komory żelbetowej, jak i palisady z kolumn *jet grouting* i jest mniejsza od dopuszczalnych wartości z normy PN-B-03264:2002.

Na podstawie wyników obliczeń numerycznych oraz po uwzględnieniu skomplikowanej pracy konstrukcji przyjęto w obu modelach numerycznych komory (tj. w dwu programach obliczeniowych), jako podstawowe zbrojenie, siatkę dwustronną z prętów stalowych klasy AIIIIN (RB500W), o średnicy 16 mm, w rozstawie co 15 cm. Przyjęto również założenie o częściowej współpracy palisady wykonanej po obrysie komory.

Konstrukcję zapadni ostatecznie zaprojektowano jako komorę monolityczną żelbetową z betonu C30/37, o współczynniku wodno-cementowym $w/c < 0,45$, zbrojonego siatkami dwustronnymi ze stali klasy AIIIIN i średnicy podanej powyżej. Z uwagi na występowanie w poziomie posadowienia gruntów spoistych w stanie plastycznym należało podczas realizacji obiektu wymienić podłoże do stropu warstwy piasków gliniastych $I_L = 0,00$.

Zgodnie z założonym i przeliczonym modelem MES komorę zapadni zaprojektowano jako posadowioną na nasypie z piasku stabilizowanego cementem i o grubości płyty fundamentowej równej 50 cm. Ściany komory zaprojektowano o grubości 50 cm, zakończone bezpośrednio w płycie fundamentowej. Biorąc pod uwagę możliwość pojawienia



Rys. 13. Przemieszczenia poziome kolumny strumieniowo-iniekcyjnej w palisadzie zabezpieczającej stateczność wykopu podczas realizacji komory zapadni dla etapu 7: a – przykład deformacji siatki MES palisady (w 10-krotnym powiększeniu) etapu 7, b – wykres przemieszczeń poziomych pala w zależności od głębokości

Fig. 13. Horizontal displacement jet grouting pile in palisade safety trench stability during the implementation of trap chamber for stage 7: a – example FEM mesh deformation a palisades (at 10 times magnification) stage 7, b – the horizontal displacement of the pile diagram depending on the depth

się wody gruntowej pod napięciem, zaprojektowano izolację przeciwwodną w postaci mat bentonitowych typu Voltex DS. W przerwach roboczych między dnem a ścianami polecono zastosować Waterstop RX 101.

W celu zabezpieczenia komory przed wyporem wody zaprojektowano po obwodzie płyty fundamentowej, w ścianie, ostrogę żelbetową zakotwioną w palisadzie *jet grouting*. Natomiast zwieńczenie ścian komory – w postaci oczepu żelbetowego opartego bezpośrednio na koronie palisady – przyczyniło się do ujednoczenia osiadań konstrukcji pod wpływem niesymetrycznych obciążeń technologicznych.

Z uwagi na kolizję skrajnego słupa istniejącej hali przyjęto jego podwieszenie w postaci specjalnej konsoli stalowej podpartej w układzie V (rys. 14), zamocowanej w słupach sąsiadujących. Zastrzały stalowe zaprojektowano z rury stalowej D212/4 mm S235JR. Połączenia węzłów skonstruowano w postaci blach węzłowych przyspawanych bezpośrednio do istniejących słupów. Elementy są łączone do węzłów za pomocą łączników śrubowych M20-10.9. Połączenia śrubowe zaprojektowano jako sprężone.



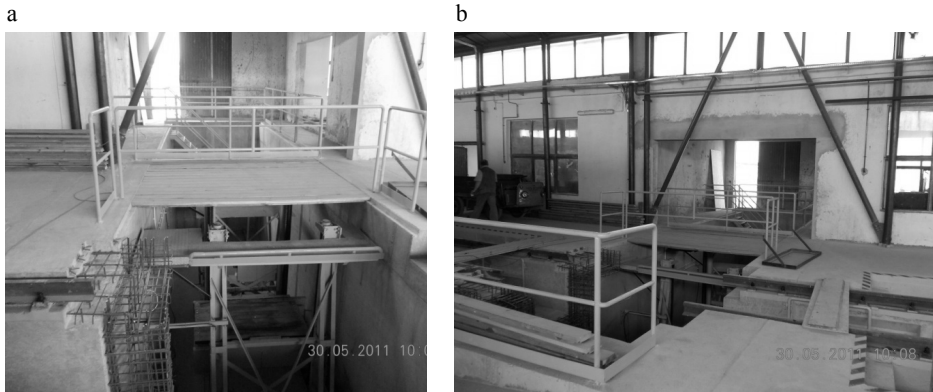
Rys. 14. Konstrukcja wsporcza z zastrzałów rurowych w miejscu likwidacji istniejącego słupa hali, aby możliwe było wykonanie zapadni kolejowej

Fig. 14. Supporting structure with a circular angle struts in a place after remove a steel column of the hall rail depot

Ponadto w przeszłe hali, w miejscu gdzie zaprojektowano komorę, wykonano stężenia podłużne słupów istniejącej hali w postaci stężeń typu X, z prętów o średnicy 25 mm.

Z uwagi na zmianę sztywności poprzecznej hali w strefie likwidacji słupa należało wzmocnić pozostałe słupy. Słupy środkowe wzmocniono przez trwałe wypełnienie przestrzeni między przewiązkami a gałęziami słupa za pomocą blachy grubości 8 mm. Zaprojektowano połączenia jako spawane (spoina pachwinowa, obwodowa o grubości nie mniejszej niż 5 mm). Podczas prac spawalniczych wykonawca musiał wykazać się daleko idącą ostrożnością z uwagi na możliwość skrzywienia słupa pod wpływem naprężeń spawalniczych. W związku z tym faktem należało dodatkowo, przed przystąpieniem do prac spawalniczych, zastosować dwie przepony na całej długości słupa, z blachy grubości 6 mm.

Widok odnowionej zapadni kolejowej po jej zrealizowaniu przedstawiają fotografie zamieszczone na rysunku 15.



Rys. 15. Komora zapadni w trakcie prac wykończeniowych: a – widok komory wraz z konstrukcją wsporczą stalową i pomostami roboczymi, b – ogólny wygląd komory wraz z miejscami połączeń z kanałami rewizyjnymi w budynku wagonowni

Fig. 15. Wheel drop pit chamber in the process of being built: a – view chamber with steel supporting structure and working platforms, b – vague view chamber with places of joints of a service and inspection pits into railway workshops

PODSUMOWANIE

Stare obiekty kolejowe, które były dotychczas zaniedbywane i dewastowane z różnych przyczyn, aktualnie są odnawiane, przebudowywane lub remontowane, często zmieniając przy tym swoje przeznaczenie, tak jak to zostało dokonane w przypadku starej hali wagonowni w Lesznie.

Zastosowanie technologii iniekcji strumieniowej przyczynia się do zwiększenia tempa realizacji prac, a ponadto metoda ta jest bardzo uniwersalna, gdyż można ją stosować do większości gruntów, z jakimi spotyka się inżynier w praktyce. Ponadto ze względu na brak drgań podczas wierceń uzyskuje się tzw. bezударowość pracy, co szczególnie przydaje się do wzmacniania fundamentów budynków i budowli zabytkowych. Nie do przecenienia jest również niewielka średnica żerdzi iniekcyjnych, które minimalizują ingerencję z zewnątrz przy robotach naprawczych lub wzmocnieniach szczególnie wrażliwych obiektów budowlanych. Ważnym czynnikiem w tej technologii jest również jej nieszkodliwość dla środowiska naturalnego, pod warunkiem zastosowania iniektów na bazie cementów. Kolejną zaletą przesłon lub palisad wykonanych w technologii *jet grouting* jest możliwość uzyskiwania kolumn o szerokim zakresie średnic – od 0,40 do nawet 5,0 m.

Dzięki uzyskanym wynikom potwierdzono, iż dopuszczalne ugięcie zarówno dla konstrukcji komory żelbetowej, jak i dla palisady z kolumn iniekcyjno-strumieniowych, które są równe $u_{\max} = l_{\text{eff}}/250 = 32 \text{ mm}$, nie są w tym przypadku przekroczone, pomimo

modelowania zmiany modułu sprężystości (E) tworzywa gruntowo-cementowego w bardzo dużym zakresie.

Zaproponowany projekt budowy zapadni kolejowej po roku eksploatacji okazał się prawidłowy, a co najważniejsze – skuteczny.

PIŚMIENNICTWO

- Bzówka J., 2003. Identyfikacja parametryczna pala wykonanego techniką wysokociśnieniowej iniekcji strumieniowej. *Inżynieria Morska i Geotechnika* 3–4, 123–126.
- Gwizdała K., Kościak P., 2007. Zastosowanie iniekcji strumieniowej do wzmacniania posadowień istniejących obiektów budowlanych. *Geoinżynieria: Drogi, Mosty, Tunele* 2, 52–57.
- Krzemieniecki A., 1976. Tabor kolejowy. WKŁ, Warszawa.
- Neumann T., 1976. Wagony i hamulce kolejowe. WKŁ, Warszawa.
- PN-77/B-02011. Obciążenia wiatrem.
- PN-80/B-02010. Obciążenia śniegiem.
- PN-80/B-02010/Az1: 2006. Obciążenia w obciążeniach statycznych. Obciążenie śniegiem.
- PN-81/B-03020. Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- PN-82/B-02000. Obciążenia budowli.
- PN-82/B-02001. Obciążenia stałe.
- PN-82/B-02003. Obciążenia zmienne i technologiczne.
- PN-82/B-02004. Obciążenia pojazdami.
- PN-86/B-02015. Obciążenia temperaturą.
- PN-90/B-03200. Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- PN-B-06200:1997. Konstrukcje stalowe budowlane. Warunki wykonania i odbioru.
- PN-B-032015:1998. Konstrukcje stalowe. Połączenia z fundamentami.
- PN-B-03264:2002. Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- PN-EN 206-1. Beton. Część I: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- PN-EN 1917:2004. Studzienki włazowe i niewłazowe z betonu niezbrojonego, z betonu zbrojonego włóknem stalowym i żelbetowe.
- PN-EN 12716: 2002. Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych. Iniekcja strumieniowa.
- Rawicki Z., Motak E., 1996. Wybrane właściwości tworzywa gruntowo-cementowego wysokociśnieniowych pali iniekcyjnych. Konferencja Naukowo-Techniczna „Zagadnienia materiałowe w inżynierii lądowej”. Politechnika Krakowska, Kraków.
- Rawicki Z., Żmudziński Z., 1998. Ocena właściwości tworzywa gruntowo-cementowego wysokociśnieniowych pali iniekcyjnych. I Problemowa Konferencja Geotechniki „Współpraca budowli z podłożem gruntowym”. Białystok – Wigry, 373–380.

REBUILDING A HALL RAILWAY WORKSHOP IN LESZNO AS RESCUE FOR RAILWAY BUILDINGS

Abstract. This study is an example of the reconstruction hall depot (WGW), which is located in Leszno. Works include, among other things, the execution and design of the supporting structure for technological equipment in the form of a reinforced concrete chamber. Concerned depot modernization of design and material solutions. The study also illustrates the strengthening of steel structure and describes the numerical model adopted for dimensioning the supporting structure – reinforced concrete chamber – with elements of the coating.

Key words: design of reinforced concrete chamber, FEM numerical model, railway depot, railway wheel drop pit

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 8.06.2013