

# Przepusty

## w infrastrukturze komunikacyjnej – cz. 11



- **prof. UZ dr hab. inż. Adam Wysokowski**, kierownik Zakładu Dróg i Mostów, Uniwersytet Zielonogórski
- **mgr inż. Jerzy Howis**, konstruktor, Infrastruktura Komunikacyjna Sp. z o.o., Żmigród
- **mgr inż. Danuta Dąbska**, specjalista, Infrastruktura Komunikacyjna Sp. z o.o., Żmigród

Jak już wspomniano w poprzednich artykułach z niniejszego cyklu, istnieje wiele metod obliczeniowych konstrukcji przepustów zarówno sztywnych, jak i podatnych. Duża liczba obecnie wykonywanych przepustów to konstrukcje podatne, współpracujące z gruntem. Z uwagi na fakt, że konstrukcje tego typu zostały wprowadzone do praktyki inżynierskiej dopiero w ostatnich latach, metody obliczeniowe tych konstrukcji są w dalszym stopniu udoskonalane. Wiąże się to również z rozwojem metod numerycznych.

### 1. Wprowadzenie

Tradycyjne metody obliczeniowe konstrukcji podatnych nie uwzględniają wielu czynników oraz danych wyjściowych, pozwalających na wierne odzwierciedlenie uzyskanych wyników z rzeczywistym zachowaniem tych konstrukcji. Pomimo wszystko metody te są jednak w dalszym ciągu szeroko stosowane wśród praktyków. Pozytywny w tym przypadku jest fakt – jak uczy doświadczenie autorów artykułu – że uzyskiwane wyniki służą bezpieczeństwu konstrukcji z uwagi na wiele konserwatywnych założeń, jakie obowiązują w tych metodach analitycznych.

Jak już wspomniano w poprzednim artykule, dużo dokładniejsze odwzorowanie rzeczywistego zachowania się konstrukcji można uzyskać za pomocą obliczeń numerycznych z użyciem metody elementów skończonych [15].

Zgodnie z zapowiedzią, w celu zilustrowania sposobu przeprowadzania obliczeń z użyciem metod obliczeń przepustów opisanych w poprzednich trzech artykułach z niniejszego cyklu, poniżej zestawiono wybrane dla czytelników przykłady obliczeń. Zakres i tematykę tych przykładów dobrano w ten sposób, aby pomimo szczupłych ram artykułu były one w jak największym wszechstronne.

Dla przypomnienia oraz dla nowych czytelników poniżej przytoczono spis artykułów na temat przepustów, które sukcesywnie od dwóch lat ukazują się w kolejnych numerach „Nowoczesnego Budownictwa Inżynierskiego” [15, 16]:

1. ARTYKUŁ WPROWADZAJĄCY
2. ASPEKTY PRAWNE PROJEKTOWANIA, BUDOWY I UTRZYMANIA PRZEPUSTÓW
3. PRZEPUSTY TRADYCYJNE
4. PRZEPUSTY NOWOCZESNE
5. PRZEPUSTY JAKO PRZEJŚCIA DLA ZWIERZĄT
6. MATERIAŁY DO BUDOWY PRZEPUSTÓW – CZ. I, CZ. II
7. METODY OBLICZEŃ KONSTRUKCJI PRZEPUSTÓW – CZ. I OGÓLNE ZASADY OBLICZEŃ
8. METODY OBLICZEŃ KONSTRUKCJI PRZEPUSTÓW – CZ. II TRADYCYJNE METODY OBLICZEŃ
9. METODY OBLICZEŃ KONSTRUKCJI PRZEPUSTÓW – CZ. III NOWE METODY OBLICZEŃ
10. METODY OBLICZEŃ KONSTRUKCJI PRZEPUSTÓW – CZ. IV. OBLICZENIA PRZEPUSTÓW METODĄ ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH – MES

### 2. Przykłady obliczeniowe przepustów wykonanych ze sztywnych rur osłonowych

Przepusty wykonane ze sztywnych rur konstrukcyjnych ułożone w gruncie praktycznie nie odkształcają się pod wpływem działającego na nie obciążenia eksploatacyjnego, co opisano w poprzednich artykułach [15]. Jak już wcześniej wykazano w wielu opracowaniach dotyczących tej tematyki, brak współpracy przekroju w przenoszeniu obciążeń powoduje silną koncentrację naprężeń w górnej i dolnej części rury. Niekorzystny rozkład sił występuje w szczególności w sytuacji, gdy grunt znajdujący się w bocznych strefach rury osłonowej został słabo zagęszczony. Sytuacja ta ma miejsce głównie podczas wykonywania przepustów metodą wykopu otwartego, gdzie istnieje konieczność stałej kontroli stopnia zagęszczenia gruntu zasypki w strefach bocznych zasypki.

Obecnie dzięki intensywnemu rozwojowi technologii wykonywania konstrukcji przepustów komunikacyjnych coraz częściej stosuje się nowoczesne technologie bezwykopowe. Pod względem pracy konstrukcji w nasypie przepusty wykonywane tą technologią nie są narażone na czynniki związane z nieprawidłowym zagęszczeniem zasypki konstrukcji, jak ma to miejsce w przypadku technologii wykopowych. Jak ogólnie wiadomo, rura przepustu wprowadzana jest w nasyp gruntowy bez naruszania jego struktury. Tym samym nie mamy tutaj do czynienia z wcześniej opisanym zjawiskiem braku współpracy rury z gruntem w strefach bocznych [8].

Warunki wykonania oraz pracy podziemnej instalacji sieci przepustowych pod nasypem drogowym lub kolejowym wymagają użycia rur o bardzo wysokiej jakości i dużej wytrzymałości. Instalowane technologią bezwykopową rury muszą spełniać szereg rygorystycznych wymagań zarówno związanych z ich cechami wytrzymałościowymi, jak i trwałościowymi. Materiał, z którego są wykonane, musi posiadać dużą wytrzymałość na ściskanie wywołane siłami przecisku, być odporny na korozję zarówno na zewnątrz rury, jak i pochodzącą od mediów oraz gwarantować bezawaryjną pracę wykonanej konstrukcji przepustu. Dlatego do wykonywania przepustów tą metodą stosuje się głównie rury pracujące w sposób sztywny (beton, polimerobeton, kamionka) oraz półsprężyste (GRP), co zostało szczegółowo opisane w literaturze przedmiotu.

W celu ilustracji używanych metod obliczeniowych do obliczania konstrukcji z rur sztywnych poniżej posłużono się przykładem obliczania przedmiotowych konstrukcji z rur ka-

mionkowych wykonywanych metodą przecisku dla różnych obciążeń komunikacyjnych wraz z wyliczeniem dopuszczalnych sił przeciskowych [7].

### PRZYKŁAD 1

Należy wykonać obliczenia przepustu z rury kamionkowej o średnicy DN 1200 mm pod linią kolejową wielotorową wykonanego w technologii bezwykopowej. Celem obliczeń jest wykazanie odpowiedniej nośności rury kamionkowej do budowy przepustu kolejowego pod wielotorową linią kolejową.

Zakresem obliczeń objęto obliczenia statyczno-wytrzymałościowe rur kamionkowych przy obciążeniach charakterystycznych dla kolejowych przepustów komunikacyjnych według normy [21].

#### Dane do obliczeń

Parametry podstawowe rury osłonowej przepustu:

- materiał użytej rury – kamionka
- średnica wewnętrzna – DN 1200 mm
- średnica zewnętrzna – 475 + 0/-36 mm
- grubość ścianki – 137,5 mm
- dopuszczalna siła wciśnięcia – 6400 kN
- średni ciężar – 990 kg/m.

#### Wyznaczenie obciążeń

Jako obciążenie do obliczeń przyjęto dwa rodzaje oddziaływań:

- obciążenia stałe, tj. ciężar własny konstrukcji, ciężar wyposażenia i parcie gruntu
- obciążenia zmienne, tj. obciążenia taborem, parcie wiatru lub kry.

Podstawowym obciążeniem stałym działającym na konstrukcję przepustu jest obciążenie gruntem i nawierzchnią, gdyż ciężar własny rury osłonowej może być w praktyce pominięty. Obciążenie gruntem możemy dodatkowo podzielić na obciążenie spełniające rolę balastu zalegającego na konstrukcji oraz jako czynne parcie gruntu przy nieobciążonym naziomiu.

Do obciążeń zmiennych działających na konstrukcję przepustu zaliczamy obciążenie taborem (samochodowym, kolejowym, tramwajowym) lub ruchem pieszych. Udział obciążenia zmiennego w obciążeniu konstrukcji maleje wraz ze wzrostem naziomu, w przeciwieństwie do obciążenia stałego, którego udział rośnie.

W przypadku obciążenia taborem samochodowym klasę obciążenia przyjęto według Polskiej Normy PN-85/S-10030 [21].

Średnie pionowe naprężenie  $p_E$  od ciężaru gruntu:

$$p_{Ev} = \chi \cdot \gamma_B \cdot h = 0,92 \cdot 20,00 \cdot 1,5 = 28,00 \text{ kN/m}^2$$

$$\chi = \frac{1 - e^{-2K_1 \tan(1/2\varphi) \frac{h}{b}}}{2K_1 \tan(1/2\varphi) \frac{h}{b}} = 0,92$$

gdzie:

$\chi$  – współczynnik zmniejszający

$h$  – zagłębienie przepustu, przyjęto  $h = 1,50$  m

$b$  – szerokość bryły gruntu obciążającego przepust,

$$b = d_a \times \sqrt{3} = 2,55 \text{ m}$$

$K_1$  – współczynnik parcia gruntu,  $K_1 = 0,5$

$\varphi$  – kąt tarcia wewnętrznego gruntu.

Obciążenia komunikacyjne:

$$p_v, p = 48,00 \text{ kN/m}^2$$

$$p_v = \varphi \cdot p = 48,00 \cdot 1,31 = 63,00 \text{ kN/m}^2$$

$$\varphi = 1,40 - 0,10(1,50 - 0,60) = 1,31$$

Całkowite obciążenie rury:

$$p = (p_{Ev} + p_v) d_a = 134,22 \text{ kN/m}^2$$

$$\gamma = \frac{F_N}{F_{cala}} \cdot EZ = \frac{114}{134,22} \cdot 2,69 = 2,28 > 2,20$$

Maksymalna wartość siły wciskającej (niepowodującej uszkodzenia rury):

$$V_{gran.} = A \frac{\beta_{LD}}{\max \sigma} = 6400 \text{ kN}$$

gdzie:

$\beta_{LD}$  – wytrzymałość kamionki na ściskanie podłużne, przyjęto  $\beta_{LD} = 150,00$  MPa

$\gamma$  – współczynnik bezpieczeństwa, przyjęto  $\gamma = 2,0$

$\max \sigma / \sigma_0$  – stosunek naprężenia maksymalnego do średniego w ściance rury, przyjęto  $\max \sigma / \sigma_0 = 2,00$

$A$  – powierzchnia docisku.

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że nośność przeciskowych rur kamionkowych DN 1200 mm jest wystarczająca dla wykonania przepustu pod wielotorową linią kolejową w technologii bezwykopowej dla zagłębienia do 1,50 m, maksymalna siła przecisku nie może być większa od 6400 kN.

### PRZYKŁAD 2

Należy przeprowadzić obliczenia dla przepustu z rury kamionkowej o średnicy DN 1200 mm pod drogą kołową wykonanego w technologii bezwykopowej [7]. Obliczenia należy wykonać dla rury kamionkowej o takich samych parametrach, jak w przykładzie 1. Zmieniony zostaje jedynie rodzaj obciążenia komunikacyjnego oraz wysokość naziomu nad konstrukcją rury. Jako obciążenie oddziaływujące na konstrukcję rury przyjęć należy tabor samochodowy według normy [21].

#### Dane do obliczeń

Parametry podstawowe rury:

- materiał użytej rury – kamionka
- średnica wewnętrzna – DN 1200 mm
- średnica zewnętrzna – 1475 + 0/-36 mm
- grubość ścianki – 137,50 mm
- dopuszczalna siła wciśnięcia – 6400 kN
- średni ciężar – 990 kg/m.

Obciążenie:

- obciążenia stałe, tj. ciężar własny konstrukcji, ciężar wyposażenia i parcie gruntu
- obciążenia zmienne, tj. obciążenia taborem samochodowym, parcie wiatru lub kry.

#### Wyznaczenie obciążeń

Średnie pionowe naprężenie  $p_E$  od ciężaru gruntu

$$p_{Ev} = \chi \cdot \gamma_B \cdot h = 0,86 \cdot 20,00 \cdot 3,00 = 51,00 \text{ kN/m}^2$$

$$\chi = \frac{1 - e^{-2K_1 \tan(1/2\varphi) \frac{h}{b}}}{2K_1 \tan(1/2\varphi) \frac{h}{b}} = 0,86$$

gdzie:

$\chi$  – współczynnik zmniejszający

$h$  – zagłębienie przepustu, przyjęto  $h = 3,00$  m

$b$  – szerokość bryły gruntu obciążającego przepust,

$$b = d_a \times \sqrt{3} = 2,55 \text{ m}$$

$K_1$  – współczynnik parcia gruntu,  $K_1 = 0,5$

$\varphi$  – kąt tarcia wewnętrznego gruntu.

Obciążenia komunikacyjne:

$$p_v, p = 17,00 \text{ kN/m}^2$$

$$\varphi = 1,40 - 0,10(3 - 0,60) = 1,16$$

$$p_v = \varphi \cdot p = 17,00 \cdot 1,16 = 19,80 \text{ kN/m}^2$$

Całkowite obciążenie rury:

$$p = (p_{Ev} + p_v) d_a = 104,43 \text{ kN/m}^2$$

$$\gamma = \frac{F_N}{F_{cala}} \cdot EZ = \frac{114}{104,43} \cdot 2,69 = 2,93 > 2,20$$

Maksymalna wartość siły wciskającej (niepowodującej uszkodzenia rury):

$$V_{gran.} = A \frac{\beta_{LD}}{\max \sigma} = 6400 \text{ kN}$$

gdzie:

$\beta_{LD}$  – wytrzymałość kamionki na ściskanie podłużne, przyjęto  $\beta_{LD} = 150,00$  MPa

$\gamma$  – współczynnik bezpieczeństwa, przyjęto  $\gamma = 2,0$

$\max \sigma / \sigma_o$  – stosunek naprężenia maksymalnego do średniego w ściance rury, przyjęto  $\max \sigma / \sigma_o = 2,00$

$A$  – powierzchnia docisku.

Analiza przeprowadzonych obliczeń potwierdza, że nośność rury kamionkowej DN 1200 jest wystarczająca dla wykonania przepustu w technologii bezwykopowej pod dowolną drogą lub ulicą o dowolnym obciążeniu ruchem kołowym dla głębokości do 3,00 m.

### 3. Przykłady obliczeniowe przepustów wykonanych z podatnych rur osłonowych

Jak już wspomniano, przy projektowaniu konstrukcji podatnych należy wziąć pod uwagę wiele parametrów losowych, występujących przede wszystkim z uwagi na obciążenia statyczne, dynamiczne oraz wywołane eksploatacją. Zagadnienia związane ze sposobem obliczania przedmiotowych konstrukcji są tematem wielu pozycji literaturowych, m.in. [2, 4, 5, 6, 10, 13].

Stosowane dokumenty prawne, w tym i normy do modelowania konstrukcji, posiadają wiele niedoskonałości i ulegają ciągłym modyfikacjom.

Newralgicznym elementem pod względem nośności tego typu konstrukcji jest reakcja powłoki na boczne parcie gruntu zasypowego. Cienka konstrukcja rury osłonowej bez prawidłowo wykonanej zasypki nie ma jeszcze właściwej nośności, którą osiągnie dopiero po pewnym czasie eksploatacji. I to właśnie faza robót związana z zasypywaniem stwarza największe problemy przy tego typu konstrukcjach. Wynika to z możliwości powstania wielu form wyboczenia i utraty stateczności. Przy obliczaniu omawianych konstrukcji ważnym czynnikiem jest

prawidłowe zamodelowanie zasypki przepustu. Obecnie w obliczeniach konstrukcji przepustów współpracujących z gruntem stosuje się coraz szerzej metodę elementów skończonych, która jest tematem wielu publikacji, żeby wymienić chociażby [1, 3, 9, 11, 12, 18].

Poniżej autorzy przedstawili wybrane przykłady odliczeń podatnych przepustów komunikacyjnych z różnych materiałów konstrukcyjnych pod różnymi obciążeniami eksploatacyjnymi.

#### PRZYKŁAD 3

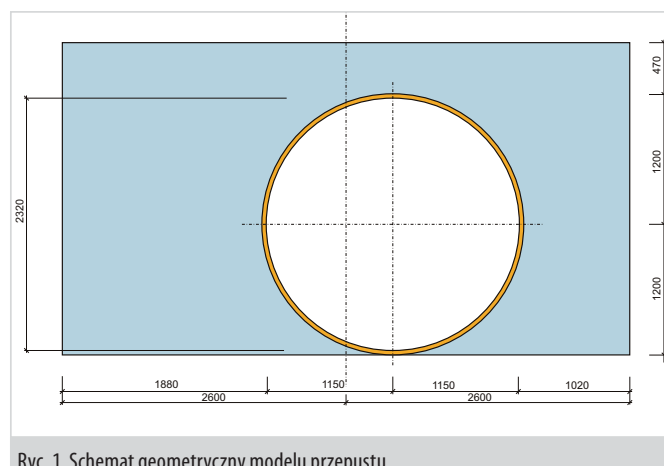
Należy wykonać obliczenia przepustu z rury wykonanej z żywicy poliestrowych zbrojonych włóknami szklanymi z systemu CC-GRP o średnicy DN 2400 pod drogą i linią tramwajową [14]. Celem obliczeń jest wykazanie dostatecznej nośności dla zastosowania rury CC-GRP jako przepustu dla przeprowadzenia kanalizacji grawitacyjnej pod linią tramwajową jednotorową oraz ulicą jednojezdniową. Tym samym zakres obliczeń sprowadza się do sprawdzenia nośności konstrukcji przy pełnej współpracy rury CC-GRP i ośrodka gruntowego w przenoszeniu obciążeń eksploatacyjnych.

#### Dane i warunki przyjęte w obliczeniach

- rurę osłonową stanowi rura z żywic poliestrowych wzmocnionych włóknem szklanym (CC-GRP)
- średnica zewnętrzna rury DN 2400 mm
- długość rury stanowiącej przepust wynosi 9,45 m
- wysokość naziomu nad kluczem rury wynosi 0,47 m
- zasypka gruntowa z piasku średniego (Ps) o stopniu zagęszczenia  $I_d = 0,67$
- rura posadowiona na żelbetowej płycie przez podkładkę gumową o grubości 50,00 mm
- obciążenia normowymi pojazdami kołowymi oraz obciążenie taborem tramwajowym
- pełna współpraca rury CC-GRP i ośrodka gruntowego w przenoszeniu obciążeń działających na konstrukcję
- model obliczeniowy jest konstrukcją w postaci prostokąta o szerokości 5,20 m i wysokości 2,87 m, pracuje wraz z rurą CC-GRP w płaskim stanie odkształcenia.

#### Schemat modelu obliczeniowego

Obliczenia przeprowadzono przy pomocy analizy numerycznej modelu przepustu. Schemat modelu przepustu przedstawiono na rycinie 1.



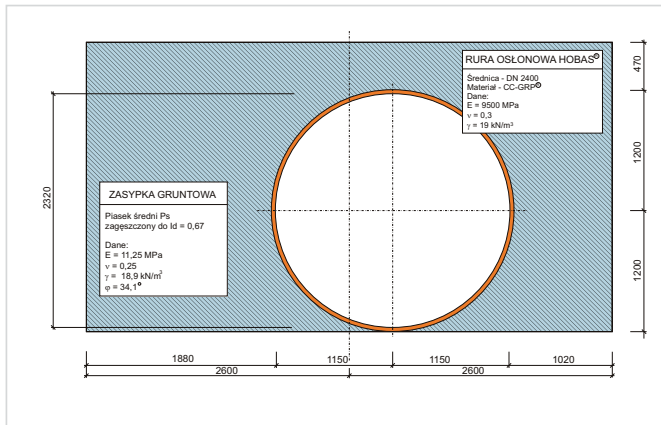
Ryc. 1. Schemat geometryczny modelu przepustu

Obliczenia numeryczne wykonano metodą elementów skończonych (MES).

Model obliczeniowy złożony jest z dwóch elementów o różnych własnościach materiałowych. Model podłoża gruntowego w sąsiedztwie przepustu zamodelowano powierzchniowymi

elementami skończonymi o czterech węzłach w każdym elemencie. Liczba statycznych stopni swobody modelu wynosiła 334. Stan naprężeń w konstrukcji przyjęto zgodnie z założeniami płaskiego stanu odkształcenia. Liczba elementów skończonych wynosiła 160, natomiast liczba węzłów 178.

Jako zasypkę przyjęto grunt w postaci piasku średniego, rurę osłonową stanowi rura z żywicy poliestrowych wzmocnianych włóknem szklanym (CC-GRP) o średnicy DN 2400. Poszczególne dane materiałowe modelu przedstawia rycina 2.



Ryc. 2. Dane materiałowe modelu przepustu

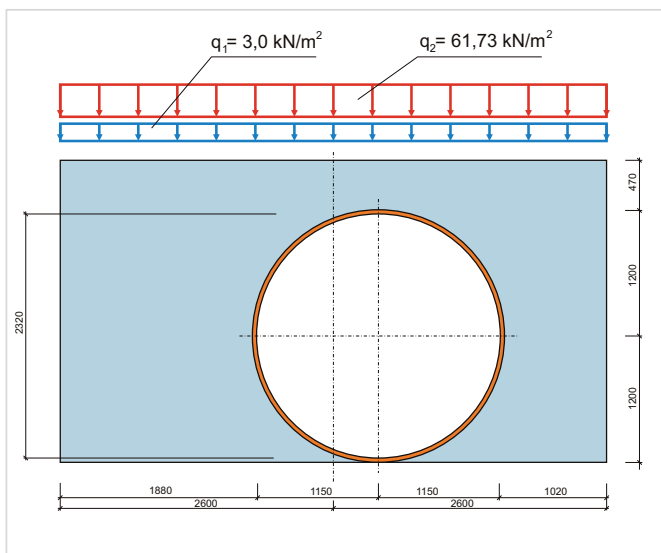
### Obciążenia

Jako obciążenie modelu przyjęto dwa rodzaje oddziaływań:  
 – ciężar własny gruntu (przyjęty przez program obliczeniowy),  
 – obciążenie charakterystyczne przepustu obciążeniem użytkowym – taborem samochodowym – jako bardziej niekorzystnego.

$$q_{1k} = 4,00 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{2k} = 61,73 \text{ kN/m}^2$$

Schemat obciążenia modelu obliczeniowego przedstawiono na rycinie 3.



Ryc. 3. Schemat obciążenia modelu obliczeniowego

### Wyniki przeprowadzonych obliczeń

Wyniki przeprowadzonych obliczeń zestawiono tabelarycznie. W tabeli 1 przedstawiono maksymalne wartości przemieszczeń pionowych i poziomych w poszczególnych węzłach konstrukcji. W tabeli 2 przedstawiono wartości maksymalne naprężeń w konstrukcji rury osłonowej.

Tab. 1. Wartości maksymalne przemieszczeń w konstrukcji rury osłonowej

Numer węzła	Przemieszczenie poziome maksymalne [cm]	Przemieszczenie pionowe maksymalne [cm]
3	–	-1,09
40	-0,45	–

Tab. 2. Wartości maksymalne naprężeń w konstrukcji rury osłonowej

Numer węzła	Naprężenia maksymalne [MPa]	Naprężenia maksymalne [MPa]
30	–	-2,89
20	1,45	–

Wartość maksymalna przemieszczenia klucza rury wynosi 0,8385 cm = 8,385 mm, zatem trwałe ugięcie rury wynosi:

$$\delta = (8,38 / 2400) \cdot 100 = 0,35 \% < \delta_{\text{dop}}$$

$$\delta = 0,35 \% < \delta_{\text{dop}} = 3\%$$

Jak widać z powyższego przykładu, trwałe ugięcie jest znacznie mniejsze od dopuszczalnego.

### PRZYKŁAD 4

Należy wykonać obliczenia przepustu z blach falistych o średnicy DN 2200 [17]. Celem obliczeń jest sprawdzenie nośności rury stalowej spiralnie karbowanej jako przepustu pod drogą kołową zgodnie z normą [21].

Obliczenia przepustu należy wykonać dwiema metodami:

- I. Analityczną – przy wykorzystaniu metody Duncana
- II. Metodą numeryczną MES.

#### I. Obliczenia metodą analityczną Duncana (Soil Culvert Interaction)

Wykorzystana w obliczeniach metoda analityczna Duncana bierze pod uwagę nieliniowe zależności naprężeń i odkształceń występujące w gruncie. Uwzględnia ona współpracę ośrodka gruntowego z konstrukcją rury oraz wpływ momentów zginających powodujących uplastycznienie ścianki przekroju.

#### Podstawowe dane przyjęte do obliczeń

- Parametry rury:
  - średnica nominalna – 200 mm
  - długość – 8000 mm
  - korugacja – 125 x 26 mm
  - grubość blachy stalowej – 3,50 mm
  - zabezpieczenie antykorozyjne – cynowanie ogniowe Z600MA + Trenchcoating obustronny 0,30 mm
- Parametry pojedynczej fali rury spiralnie karbowanej podane na jednostkę jej długości:
  - $A_s = 3,88 \text{ [mm}^2/\text{mm]}$
  - $J_s = 337,20 \text{ [mm}^4/\text{mm]}$
  - $W_s = 23,00 \text{ [mm}^3/\text{mm]}$ .
- Gatunek stali: DX51D zgodnie z normą PN-EN 10327:2006 [23]:
  - wytrzymałość na rozciąganie  $R_m = 270\text{-}500 \text{ [MPa]}$
  - wydłużenie  $A_{80 \text{ min}} = 22 \text{ [%]}$ .
- Charakterystyczne obciążenie przepustu - klasa A według normy PN-85/S-10030 [21].
- Parametry zasyпки gruntowej:
  - grunt nośny kategorii G1 – mieszanka żwiru i piasku o maksymalnych wymiarach ziarna 32 mm zagęszczona do  $I_d = 0,95$ . Ciężar objętościowy  $\gamma = 20,50 \text{ kN/m}^3$

– współczynnik zależności sztywności ścianki konstrukcji do sztywności gruntu  $N_f$

$$N_f = (E_s \cdot D_H^3) / E \cdot I$$

$$N_f = (24,00 \cdot 2200^3) / (205000 \cdot 337,20) = 3696,90.$$

### Wyznaczenie współczynnika bezpieczeństwa (SF)

Ze względu na małą wartość naziomu nad przedmiotową konstrukcją współczynnik bezpieczeństwa przyjęto na poziomie  $SF = 1,65$

### Wyznaczenie sił wewnętrznych w stanie użytkowania

– wyznaczenie siły normalnej w ścianie rury spiralnie karbowanej

$$T = K_{p1} \gamma D_H^2 + K_{p2} \gamma HD_H + K_{p3} \gamma LL$$

gdzie:

$$K_{p1} = 0,2R/D_H = 0,2 \cdot 1,10/2,20 = 0,10$$

$$K_{p2} = 0,90 - 0,5(R/D_H) = 0,9 - 0,5(1,10/2,20) = 0,65$$

$$K_{p3} = 1,00$$

$$LL = 162,04 \text{ kN/m (LL wyznaczono dla naziomu 0,7m)}$$

$$T_k = (0,10 \cdot 20,5 \cdot 2,20^2) + (0,65 \cdot 20,5 \cdot 0,70 \cdot 2,20) + 1,00 \cdot 162,04 = 192,48 \text{ kN}$$

$$T_d = 192,482 \cdot 1,65 = 317,60 \text{ kN.}$$

### Wyznaczenie momentu zginającego w ścianie rury spiralnie karbowanej

$$M = R_B (K_{m1} \gamma D_H^3 - K_{m2} \gamma HD_H^2) + R_L K_{m3} \gamma D_H LL$$

gdzie:

$$R_B = 1,00$$

$$K_{m1} = 0,00046 - 0,0010 \log_{10} N_f = 0,00046 - 0,0010 \cdot \log_{10} 3693,9 = 0,00311$$

$$K_{m2} = 0,018 - 0,0040 \log_{10} N_f = 0,00373$$

$$R_L = (3,77 + 0,75 \log_{10} N_f) / [(0,7/2,20)^{0,75}] = 2,58 \leq 1,0, \text{ przyjęto } 1,00$$

$$K_{m3} = 0,12 - 0,018 \log_{10} N_f = 0,0558$$

$$LL = 162,04 \text{ kN/m}$$

$$M = 1,0 (0,00311 \cdot 20,5 \cdot 2,20^3 - 0,00373 \cdot 20,5 \cdot 2,20^2 \cdot 0,70) + 1,0 \cdot 0,0558 \cdot 2,20 \cdot 162,04$$

$$M_k = 20,311 \text{ kNm}$$

$$M_d = 20,311 \cdot 1,65 = 33,51 \text{ kNm.}$$

### Wyznaczenie naprężeń maksymalnych w powłoce w stanie użytkowania

$$\sigma = (N_d/A_s) + (M_d/W_s)$$

$$\sigma = (317,60/3,88) + (33,51/23,00) = 83,31 \text{ N/mm}^2 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma \leq f_d = 270,00 \text{ MPa}$$

## II. Obliczenia metodą elementów skończonych

Z uwagi na charakter obliczeń przepustu metodą numeryczną MES dane geometryczne modelu obliczeniowego zostały tak dobrane, aby w pełni odzwierciedlały przyszłościowe możliwe do wykonania badania przepustu w skali naturalnej. Uzyskane w ten sposób wyniki obliczeń prawdopodobnie mogłyby stanowić bazę porównawczą do wyników badań przedmiotowej konstrukcji w skali naturalnej.

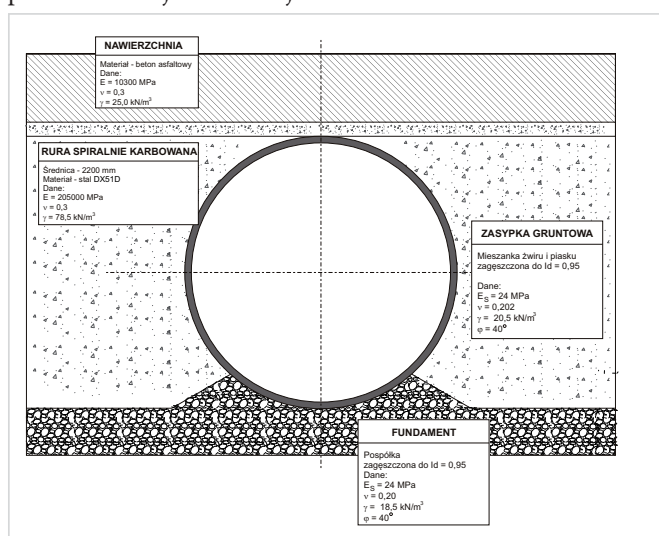
### Schemat modelu obliczeniowego

Przyjęty model obliczeniowy stanowi prostokąt o wymiarach 5,000 x 3,352 m. Pracuje on ze stalową rurą spiralnie karbowaną w płaskim stanie odkształcenia. Występuje pełna współpraca rury stalowej i ośrodka gruntowego w przenoszeniu obciążeń działających na konstrukcję. Model obliczeniowy jest osiowo-symetryczny.

Model podłoża gruntowego w sąsiedztwie rury osłonowej zamodelowano powierzchniowymi elementami skończonymi o czterech węzłach w każdym elemencie. Liczba statycznych stopni swobody modelu wynosiła 352. Stan naprężeń w konstrukcji przyjęto zgodnie z założeniami płaskiego stanu od-

kształcenia. Liczba elementów skończonych wynosiła 188, natomiast liczba węzłów 187.

Na rycinie 4 przedstawiono schemat modelu obliczeniowego przedmiotowej konstrukcji.



Ryc. 4. Schemat modelu obliczeniowego oraz dane materiałowe

### Podstawowe dane przyjęte do obliczeń

- Posadowienie konstrukcyjnej rury stalowej zaprojektowano na fundamencie kruszywowym z pospółki o maksymalnym wymiarze ziaren 32,0 mm o miąższości 0,40 m wyprofilowanym odpowiednio do kształtu rury (rura o przekroju kołowym). Warstwy konstrukcyjne nawierzchni przyjęto typowe jak dla nawierzchni drogi klasy A (tab. 3).

Tab. 3. Warstwy konstrukcyjne nawierzchni przyjęte w modelu obliczeniowym

Warstwa	Grubość [cm]
Warstwa ścierna SMA	4,00
Warstwa wiążąca BA	10,00
Podbudowa zasadnicza BA	14,00
Podbudowa pomocnicza kruszywo łamane	15,00
Warstwa odsączająca	15,00
<b>Łącznie</b>	<b>58,00</b>

- Minimalny naziom nad konstrukcją rury stalowej przyjęto ze wzoru:

$$H = (B/8) + 0,2 > 0,60 \text{ m}$$

gdzie:

B – średnica rury osłonowej (2,20 m)

$$H = (2,20/8) + 0,2 = 0,27 + 0,20 = 0,47 \text{ m}$$

do dalszych obliczeń przyjęto naziom 0,70 m.

- Przyjęty model obliczeniowy złożony jest z trzech elementów o różnych właściwościach materiałowych.
- Zasyпка gruntowa przepustu z gruntu nośnego klasy G1 w postaci mieszanki piasku grubego i żwiru zagęszczoną do  $I_d = 0,95$ . Zasyпка spełnia wymagania norm PN-S-02205:1998 [22], PN-B-11112:1996 [19] oraz PN-EN 1997-1 [20]. Kruszywo zostało dobrane dla profilu fali przedmiotowej rury osłonowej (125 x 26 mm) tak, aby jego uziarnienie nie przekroczyło maksymalnego wymiaru ziaren ustalonego na 32,0 mm.
- Parametry rury:
  - średnica nominalna – DN 2200 mm
  - długość – 8000 mm
  - korugacja – 125 x 26 mm
  - grubość blachy stalowej – 3,50 mm

- zabezpieczenie antykorozyjne – cynkowanie ogniowe Z600MA + Trenchcoating obustronny 0,3 mm
- profil fali i geometryczne parametry ją charakteryzujące:
  - wymiar fali 125 x 26 mm
  - grubość blachy stalowej 3,50 mm
- parametry pojedynczej fali podane na jednostkę jej długości:
  - $A = 3,88 \text{ [mm}^2/\text{mm]}$
  - $J = 337,20 \text{ [mm}^4/\text{mm]}$
  - $W = 23,00 \text{ [mm}^3/\text{mm]}$

gdzie:

$A$  – pole powierzchni na jednostkę długości fali

$J$  – moment bezwładności na jednostkę długości fali

$W$  – wskaźnik wytrzymałości na jednostkę długości fali

- gatunek stali – DX51D zgodnie z normą PN-EN 10327:2006 [23]

wytrzymałość na rozciąganie  $R_m$  – 270÷500 [MPa]

wydłużenie  $A_{80 \text{ min}}$  – 22 [%].

■ Obciążenie modelu:

- ciężar własny gruntu:

$$G = \sum \gamma_i h_i$$

$$G = 0,70 \cdot 20,50 = 14,35 \text{ kN/m}^2$$

- obciążenie charakterystyczne przepustu obciążeniem użytkowym (klasa A według normy PN-85/S-10030 [21]):

- współczynnik dynamiczny  $\varphi$

$$\varphi = 1,35 - 0,005 L$$

$$\varphi = 1,35 - 0,005 \cdot 2,20 = 1,339$$

w przypadku naziomu  $h = 0,7 \text{ m}$  współczynnik dynamiczny

$\varphi$  wynosi:

$$\phi(h) = 1 + [(1,0 - h)(\varphi - 1,0)] / 0,5 = 1,051$$

$$q_{1k} = 4,00 \text{ kN/m}^2$$

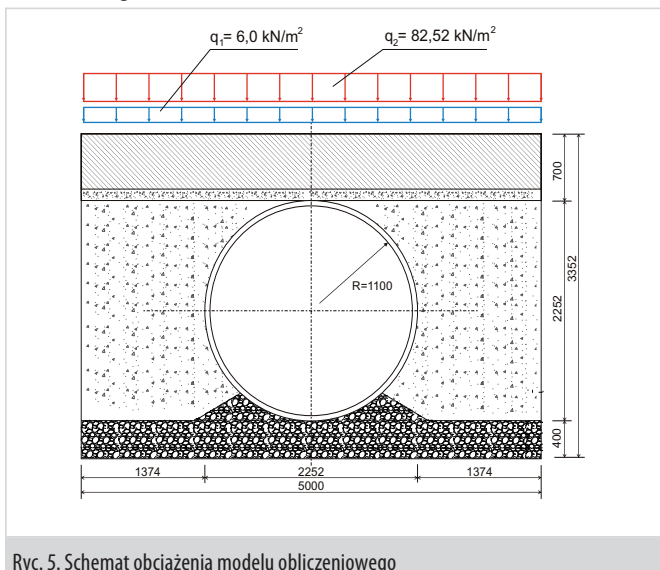
$$q_{2k} = 55,016 \text{ kN/m}^2$$

- obciążenie obliczeniowe przepustu obciążeniem użytkowym:

$$q_{1f} = q_{1k} \cdot \gamma_f = 4,00 \cdot 1,50 = 6,00 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{2f} = q_{2k} \cdot \gamma_f = 55,02 \cdot 1,50 = 82,52 \text{ kN/m}^2$$

Na rycinie 5 przedstawiono schemat obciążenia modelu obliczeniowego.



Ryc. 5. Schemat obciążenia modelu obliczeniowego

**Wyniki przeprowadzonych obliczeń**

Wyniki przeprowadzonych obliczeń zestawiono w tabelach 4 i 5. W tabeli 4 przedstawiono maksymalne wartości przemieszczeń pionowych i poziomych w poszczególnych węzłach konstrukcji, natomiast w tabeli 5 maksymalne wartości naprę-

żeń w ścianie konstrukcji rury osłonowej w poszczególnych węzłach konstrukcji.

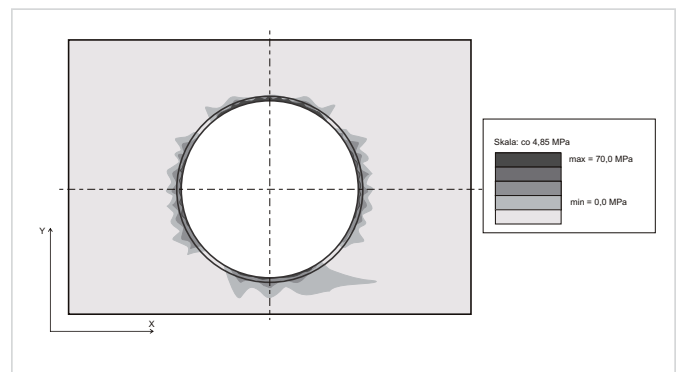
Tab. 4. Wartości maksymalne przemieszczeń w konstrukcji rury osłonowej

Numer węzła	Przemieszczenie poziome maksymalne [cm]	Przemieszczenie pionowe maksymalne [cm]
64	–	-1,60
26	-0,53	–

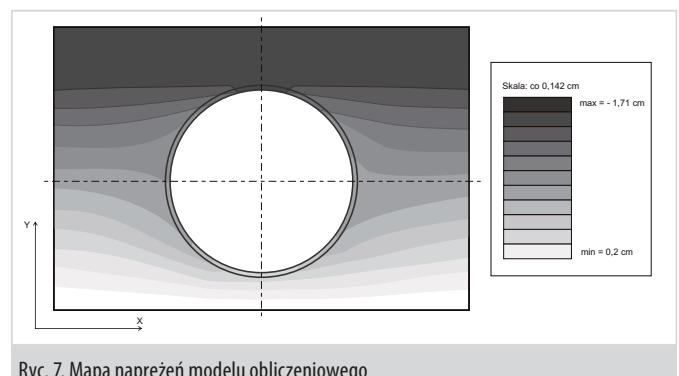
Tab. 5. Wartości maksymalne naprężeń w konstrukcji rury osłonowej

Numer węzła	Naprężenie maksymalne [MPa]
64	66,42

Na rycinie 6 przedstawiono mapę przemieszczeń pionowych modelu obliczeniowego, a na rycinie 7 mapę naprężeń modelu obliczeniowego.



Ryc. 6. Mapa przemieszczeń pionowych modelu obliczeniowego



Ryc. 7. Mapa naprężeń modelu obliczeniowego

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że maksymalna wartość przemieszczenia pionowego w kluczu rury stalowej wynosi 15,95 mm, zatem trwale teoretyczne ugięcie rury wyniesie:

$$\delta = (15,95 / 2200) \cdot 100 = 0,73 \% < 3,00 \%$$

**Zestawienie i porównanie wyników obliczeniowych metody analitycznej oraz metody elementów skończonych**

Głównym analizowanym parametrem obliczeniowym dotyczącym przedmiotowej konstrukcji jest maksymalna wartość naprężenia w ścianie klucza rury stalowej.

Maksymalne naprężenie wynosi odpowiednio:

- na podstawie obliczeń analitycznych:

$$\sigma_{\text{Duncan}} = 83,31 \text{ MPa}$$

- na podstawie analizy komputerowej:

$$\sigma_{\text{MES}} = 66,42 \text{ MPa.}$$

Wytrzymałość na rozciąganie  $R_m$  stali DX51D przyjęto 270 MPa, zatem:

$$\sigma_{\text{Duncan}} \leq f_d,$$

$$\sigma_{\text{MES}} \leq f_d.$$

Na podstawie powyższych obliczeń widać, że trwałe ugięcie obliczanej rury stalowej jest mniejsze od dopuszczalnego, a wytrzymałość na rozciąganie jest mniejsza od granicy plastyczności dla gatunku stali, z którego została wykonana przedmiotowa stalowa rura karbowana.

#### 4. Podsumowanie

Przedstawione w niniejszym artykule przykłady obliczeniowe nie wyczerpują całkowicie przedmiotowego tematu z uwagi na jego szczupłe ramy. Autorzy uważają, że z uwagi na szeroki zakres poruszonych zagadnień będzie zapewne w przyszłości istniała konieczność rozwinięcia tematyki niniejszego artykułu. Będzie to tym bardziej celowe, że unowocześniane metody komputerowe znacznie udoskonalają procedury obliczeniowe dotyczące tych konstrukcji. Co za tym idzie, zbliżają projektantów do odzwierciedlenia rzeczywistego zachowania się konstrukcji w ośrodku gruntowym.

Zawartość kilku ostatnich artykułów stanowi przegląd wybranych metod obliczeniowych, zarówno analitycznych, jak i wykorzystujących metodę elementów skończonych. Skomplikowane obliczenia numeryczne umożliwiają branie pod uwagę większej liczby czynników oddziałujących na konstrukcję, a tym samym rzutujących na stopień dokładności otrzymywanych wyników. Poznawanie pracy tych konstrukcji staje się czynnikiem mającym bezpośredni wpływ na aspekty ekonomiczne związane z kosztami wykonawstwa obiektów inżynierskich.

Zdaniem autorów, cennym uzupełnieniem niniejszego cyklu artykułów dotyczących obliczeń przepustów jest niniejsza część zawierająca przykłady obliczeniowe. Dodatkowo przykłady obliczeniowe umożliwiają analizy i porównania otrzymywanych wyników pomiędzy metodami analitycznymi a numerycznymi.

Stopień odzwierciedlenia rzeczywistości przez porównanie opisanych w tym cyklu artykułów wielu znanych analitycznych metod obliczeniowych, a także metod numerycznych z użyciem metody elementów skończonych został przez prof. Adama Wysokowskiego zweryfikowany w wielu przeprowadzonych badaniach konstrukcji przepustów w skali naturalnej. Zagadnienie to zostanie przedstawione w planowanym artykule na temat badań przepustów w skali naturalnej w ramach niniejszego cyklu publikacji.

Tematyka poruszona w niniejszej serii artykułów, dotycząca w szczególności obliczeń konstrukcji przepustów, jest niezwykle ważna i wymaga jeszcze wiele badań i analiz.

TYM SAMYM TRADYCYJNIE JUŻ ZAPRASZAMY DO ZAPOZNANIA SIĘ Z NASTĘPNYM ARTYKUŁEM, KTÓRY ZOSTANIE ZAMIESZCZONY W KOLEJNYM NUMERZE „NOWOCZESNEGO BUDOWNICTWA INŻYNIERYJNEGO”, STANOWIĄC KONTYNUACJĘ TEMATYKI PODJĘTEJ W POPRZEDNICH ARTYKUŁACH.

#### Literatura

- [1] Bąk R., Burczyński T.: *Wytrzymałość materiałów z elementami ujęcia komputerowego*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa 2001.
- [2] Bęben D., Mańko Z.: *Problemy projektowe i wykonawcze związane z gruntowo-stalowymi obiektami mostowymi*. „Geoinżynieria. Drogi, Mosty, Tunele” 2009, nr 1.
- [3] Gierszewska M.: *Metoda elementu skończonego – wprowadzenie*. Materiały dydaktyczne Akademii Górniczo-Hutniczej. Kraków 2005.
- [4] Janusz L., Madaj A.: *Obiekty inżynierskie z blach falistych. Projektowanie i wykonawstwo*. WKiŁ. Wrocław 2007.
- [5] Kunecki B.: *Zachowanie się ortotropowych powłok walcowych w ośrodku gruntowym pod statycznym i dynamicznym obciążeniem*

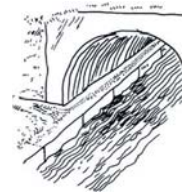
- zewnętrznym. Rozprawa doktorska, Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej. Raport serii PRE nr 14/2006. Wrocław 2006.
- [6] Machelski C.: *Modelowanie mostowych konstrukcji gruntowo-powłokowych*. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne. Wrocław 2008.
- [7] Madryas C., Wysocki L., Wysokowski A.: *Obliczenia statyczno-wytrzymałościowe rur kamionkowych*. Raport Instytutu Inżynierii Łądowej Politechniki Wrocławskiej. Wrocław, czerwiec 2007.
- [8] Madryas C., Kolonko A., Szot A., Wysocki L.: *Mikrotunelowanie*. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne. Wrocław 2006.
- [9] Rakowski G.: *Metoda elementów skończonych. Wybrane problemy*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2006.
- [10] Rowińska W., Wysokowski A., Pryga A.: *Zalecenia projektowe i technologiczne dla podatnych konstrukcji inżynierskich z blach falistych*. GDDKiA – IBDiM. Żmigród 2004.
- [11] Rusiński E., Czmochoński J., Smolnicki T.: *Zaawansowana metoda elementów skończonych w konstrukcjach nośnych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 2000.
- [12] Sawicki W.: *Wyznaczenie sił wewnętrznych w stalowej konstrukcji podatnej nowoczesnego przepustu z blach falistych*. Praca magisterska w specjalności drogowo-mostowej wykonana pod kierunkiem prof. UZ Adama Wysokowskiego. Uniwersytet Zielonogórski. Zielona Góra 2006.
- [13] Vaslestad J.: *Soil structure interaction of buried culverts*. Rozprawa doktorska, Institutt for Geoteknikk, NTNU. Trondheim 1990.
- [14] Wysokowski A., Howis J.: *Obliczenia numeryczne rury CC-GRP z uwzględnieniem współpracy z gruntem*. Raport nr Infra-Kom Pr/02308/W. Infrastruktura Komunikacyjna Sp. z o.o. Żmigród, listopad 2008.
- [15] Wysokowski A., Howis J.: *Przepusty w infrastrukturze komunikacyjnej – cz. 1. Artykuł wprowadzający*. „Nowoczesne Budownictwo Inżynierskie” 2008, nr 2 (17), s. 52–56; cz. 2. *Aspekty prawne projektowania, budowy i utrzymania przepustów*, nr 3 (18), s. 68–73; cz. 3. *Przepusty tradycyjne*, nr 4 (19), s. 54–59; cz. 4. *Przepusty nowoczesne*, nr 5 (21), s. 84–88; cz. 5. *Przepusty jako przejścia dla zwierząt*, 2009, nr 1 (22), s. 70–75; cz. 6. *Materiały do budowy przepustów – cz. I*, nr 3 (24), s. 99–104; cz. II, nr 5 (26), s. 36–43; cz. 7. *Metody obliczeń konstrukcji przepustów – cz. I. Ogólne zasady obliczeń*, 2010, nr 2 (29), s. 88–95; cz. II *Tradycyjne metody obliczeń*, 2010 nr 3 (30), s. 96–103; cz. III *Nowe metody obliczeń*, 2010, nr 5 (32), s. 72–81, cz. IV *Obliczenia przepustów Metodą Elementów Skończonych – MES*, 2011, nr 3 (36), s. 54–57.
- [16] Wysokowski A., Kubiak Z., Howis J.: *Przepusty tradycyjne*. „Nowoczesne Budownictwo Inżynierskie” 2008, nr 4 (19), s. 54–59.
- [17] Wysokowski A., Howis J., Dąbska D., Pabich M.: *Wykonanie obliczeń teoretycznych rury stalowej spiralnie karbowanej o przekroju kołowym Ø 2200 mm do zastosowań w konstrukcji przepustów drogowych*, Raport nr Infra-Kom R/06811/W. Infrastruktura Komunikacyjna Sp. z o.o. Żmigród, marzec 2011.
- [18] Zagrajek T., Krzesiński G., Marek P.: *Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji. Ćwiczenia z wykorzystaniem ANSYS*. Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2005.
- [19] PN-B-11112:1996 *Kruszywa mineralne. Kruszywa łamane do nawierzchni drogowych*.
- [20] PN-EN 1997-1:2008 Eurokod 7: *Projektowanie geotechniczne. Cz. 1. Zasady ogólne*.
- [21] PN-85/S-10030 *Obiekty mostowe. Obciążenia*.
- [22] PN-S-02205:1998 *Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania*.
- [23] PN-EN 10327:2006 *Taśmy i blachy ze stali niskowęglowych powlekanie ogniowo w sposób ciągły do obróbki plastycznej na zimno*.
- [24] Katalogi branżowe firmy Keramo-Steinzeug N.V.
- [25] Katalog konstrukcji przepustów i przejść dla zwierząt w infrastrukturze komunikacyjnej firmy Hobas. Raport nr R/01708/W. Infrastruktura Komunikacyjna Sp. z o.o. Żmigród, czerwiec 2008.

# PRZEPUSTY I PRZEJŚCIA DLA ZWIERZĄT w infrastrukturze komunikacyjnej



7-8 grudnia 2011

Świąteczna Drogowo-Mostowa Żmigrodzka  
Konferencja Naukowo-Techniczna



## OGÓLNY PLAN KONFERENCJI

### 07.12.2011 r. (środa)

Otwarcie konferencji. Słowo wstępne

#### Sesja I niebieska

Przepusty w infrastrukturze komunikacyjnej. Teoria i praktyka

#### Sesja II czerwona

Forum dyskusyjne na temat przepustów i przejść dla zwierząt

Tematyka poszczególnych części forum:

- nauka i badania
- aspekty prawne
- inwestycje
- projektowanie
- materiały do budowy przepustów i przejść dla zwierząt (beton, GRP, blachy faliste, tworzywa sztuczne, kamionka itp.)
- wykonawstwo
- eksploatacja i utrzymanie
- ekologia

### 08.12.2011 r. (czwartek)

#### Sesja III zielona

Przejścia dla zwierząt w infrastrukturze komunikacyjnej.

Teoria i praktyka

Dyskusja generalna i podsumowanie konferencji

[www.infra-kom.eu](http://www.infra-kom.eu)



**INFRASTRUKTURA  
KOMUNIKACYJNA**  
Żmigród

Komitet Organizacyjny  
Infrastruktura Komunikacyjna  
Badania – Szkolenia – Konsulting Sp. z o. o.  
ul. Przemysłowa 2  
55-140 Żmigród  
tel.: 71 385 31 00  
kom. 603 97 44 17  
fax: 71 385 30 68  
e-mail: [infra-kom@infra-kom.eu](mailto:infra-kom@infra-kom.eu)