

**Politechnika Krakowska**  
**Wydział Inżynierii Lądowej**

**PRACA DOKTORSKA**

**Optymalne kształtowanie łuków sprężystych  
dla wielorakich stanów obciążeń**

**Jacek Ostaficzuk**

**Promotor: dr hab. inż. Leszek Mikulski, prof. PK**

**Kraków 2007**



# Spis Treści

<b>1</b>	<b>Wstęp</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Aktualny stan zagadnienia</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Problemy sterowania optymalnego</b>	<b>6</b>
3.1	Zadanie podstawowe . . . . .	6
3.2	Warunki konieczne optymalności . . . . .	7
3.2.1	Zasada minimum . . . . .	7
3.3	Zadania z ograniczeniami . . . . .	7
3.3.1	Ograniczenia zależne od sterowania i stanu . . . . .	8
3.3.2	Ograniczenia na stan układu . . . . .	8
3.3.3	Wewnętrzne warunki punktowe . . . . .	9
3.3.4	Funkcje celu . . . . .	9
3.4	Programy numeryczne . . . . .	10
<b>4</b>	<b>Optymalizacja łuków ciągłych</b>	<b>11</b>
4.1	Kształtowanie na minimum maksymalnego ugięcia . . . . .	11
4.1.1	Pręty zakrzywione w płaszczyźnie sił . . . . .	11
4.1.2	Sformułowanie problemu . . . . .	14
4.1.3	Warunki konieczne . . . . .	15
4.1.4	Struktura sterowania . . . . .	19
4.2	Kształtowanie na minimum maksymalnego naprężenia normalnego . . . . .	19
4.3	Kształtowanie na minimum objętości . . . . .	21
4.4	Rezultaty numeryczne . . . . .	21
4.4.1	Minimalizacja maksymalnego ugięcia . . . . .	21
4.4.2	Minimalizacja maksymalnego naprężenia normalnego . . . . .	22
4.4.3	Minimalizacja objętości . . . . .	22
4.5	Uwagi . . . . .	23

<b>5</b>	<b>Optymalizacja przekroju poprzecznego wiaduktu drogowego, poddanego działaniu różnych stanów obciążenia</b>	<b>25</b>
5.1	Założenia projektowe . . . . .	25
5.2	Dane techniczne projektowanego wiaduktu . . . . .	26
5.2.1	Ogólna charakterystyka wiaduktu . . . . .	26
5.2.2	Zestawienie podstawowych parametrów obiektu mostowego . . . . .	27
5.3	Rozwiązania architektoniczno-budowlane . . . . .	28
5.3.1	Uzasadnienie przyjętego rozwiązania . . . . .	28
5.3.2	Opis technologii montażu obiektu przyjętego do realizacji . . . . .	28
5.3.3	Materiały konstrukcyjne . . . . .	29
5.4	Obliczenia statyczne oddziaływań pomostu na łuki żelbetowe . . . . .	29
5.4.1	Zakres obliczeń . . . . .	29
5.4.2	Parametry materiałowe . . . . .	30
5.4.3	Oddziaływanie tarcz podporowych i podpór montażowych na łuki żelbetowe w fazie montażu płyty pomostu . . . . .	30
5.4.4	Oddziaływanie tarcz podporowych na łuki żelbetowe w fazie eksploatacji . . . . .	30
5.5	Model matematyczny łuków żelbetowych . . . . .	37
5.5.1	Równanie osi łuków . . . . .	37
5.5.2	Wyznaczenie odcinków betonowania . . . . .	37
5.5.3	Fazy pracy łuków żelbetowych . . . . .	39
5.6	Obciążenia działające na łuk . . . . .	41
5.6.1	Moduł Young'a betonu w fazie montażu . . . . .	50
5.6.2	Sprowadzone pole powierzchni przekroju zespolonego . . . . .	50
5.6.3	Sprowadzony moment statyczny przekroju zespolonego . . . . .	51
5.6.4	Położenie osi obojętnej . . . . .	51
5.6.5	Sprowadzony moment bezwładności przekroju zespolonego . . . . .	52
5.6.6	Charakterystyki geometryczne przekroju całego obiektu . . . . .	53
5.6.7	Obciążenia odniesione do osi łuku . . . . .	55
5.7	Równania stanu . . . . .	58
5.8	Warunki brzegowe . . . . .	75
5.8.1	Wewnętrzne warunki punktowe . . . . .	76
5.9	Warunki ograniczające . . . . .	76
5.10	Sformułowanie zadania optymalizacji wiaduktu . . . . .	81
5.10.1	Rozwiązanie optymalne - wyniki obliczeń . . . . .	82
5.10.2	Rozwiązanie praktyczne odcinkowo stałe . . . . .	85
5.10.3	Wymiarowanie zbrojenia . . . . .	87
<b>6</b>	<b>Optymalizacja łuku na rusztowaniu stałym</b>	<b>110</b>
6.1	Fazy montażowe i opis uwzględnionych obciążeń . . . . .	110
6.2	Sformułowanie zadania optymalizacji . . . . .	111

6.3	Porównanie uzyskanych rezultatów . . . . .	113
<b>7</b>	<b>Zakończenie</b>	<b>115</b>
<b>8</b>	<b>Dodatek - D1</b>	<b>121</b>

# Rozdział 1

## Wstęp

Praca dotyczy optymalnego kształtowania przekroju poprzecznego wieloprzęsłowego łuku przy różnych stanach obciążenia w obecności ograniczeń. Przyjętą funkcją celu jest objętość łuku. Problemy optymalnego kształtowania formułowane są w pracy w kategoriach teorii sterowania. Warunki konieczne rozwiązania optymalnego zestawiono na podstawie zasady maksimum (minimum). Otrzymano w efekcie wielopunktowy problem brzegowy dla układu równań różniczkowych zwyczajnych (WPPB), który następnie rozwiązano numerycznie. Program numeryczny `dircol-2.1` uzupełniony o własne procedury pozwolił uzyskać rozwiązanie, które spełnia warunki konieczne optymalności. W pracy dyskutowany jest problem optymalnego kształtowania przekroju poprzecznego uwzględniającego: etapy montażu łuku dla przyjętej technologii wykonania, etap montażu płyty pomostu z uwzględnieniem pracy podpór montażowych oraz stany eksploatacji. Wyróżniono szesnaście różnych stanów obciążenia.

Zasadniczym celem pracy jest uwzględnienie w problemie optymalnego kształtowania wielorakich stanów obciążeń wynikających z montażu łuku, montażu płyty pomostu i stanów eksploatacji, przy założeniu, że przekrój poprzeczny łuku jest zespolony betonowo-betonowy. W pracy poszukujemy odpowiedzi na pytanie czym skutkuje uwzględnienie różnych sposobów montażu łuku (rusztowanie przesuwne, rusztowanie stałe) w zadaniach optymalizacji. Odpowiedzi na to pytanie oczekuje praktyka inżynierska.

Etapy montażu zostały ustalone na podstawie opisu montażu obiektu rzeczywistego. Uwzględnienie w zadaniu optymalizacji jednocześnie szesnastu etapów (faz) montażu i eksploatacji wymagało takiego zapisu równań stanu, aby granicami przedziałów charakterystycznych były wyłącznie położenia podpór stałych.

Zasadniczy problem optymalnego kształtowania łuków dla wielorakich stanów obciążeń poprzedzony będzie optymalizacją łuków ciągłych dla zadanego (jednego) stanu obciążenia i różnych funkcji celu.

## Rozdział 2

# Aktualny stan zagadnienia

Problemy optymalnego kształtowania ciągłych układów prętowych dla pewnej klasy obciążeń były przedmiotem pracy [27], optymalizowany był jednorodny prostokątny przekrój poprzeczny łuku dwuprzęsłowego dla trzech różnych stanów obciążenia, funkcją celu była suma maksymalnych ugięć. W pracach [15],[16],[17] autorzy optymalizują belki stalowe, zespolone i ramę stalową na minimum objętości uwzględniając pięć różnych kombinacji obciążeń przy ograniczeniach normowych. Uwzględnienie w optymalizacji wielorakich stanów obciążeń, tak istotnych w projektowaniu konstrukcji, nie ma bogatej literatury. Optymalizacja stalowo-betonowych dźwigarów zespolonych w kategoriach teorii sterowania została szczegółowo przedstawiona w pracy [15]. Pewne pomysły tam zawarte, a dotyczące ograniczenia liczby przedziałów charakterystycznych zostały także wykorzystane w tej pracy przy konstrukcji równań stanu. Dzięki wykorzystaniu funkcji indykatorowej możliwe staje się ograniczenie liczby przedziałów charakterystycznych, co prowadzi do znacznego zmniejszenia wymiaru wielopunktowego problemu brzegowego dla układu równań różniczkowych. WPPB może być rozwiązany wyłącznie na drodze numerycznej. Obecnie istnieje wiele programów, które służą do rozwiązywania zadań optymalnego sterowania, warto jednak podkreślić, że tylko nieliczne z nich są w stanie skutecznie wyznaczyć rozwiązanie złożonego zadania optymalizacji z ograniczeniami [40].

# Rozdział 3

## Problemy sterowania optymalnego

W rozdziale tym zestawione zostaną podstawowe określenia, definicje i twierdzenia na podstawie których, wyznaczono rozwiązania, sformułowanych w następnych rozdziałach, zadań optymalnego kształtowania [1].

### 3.1 Zadanie podstawowe

Podstawowe zadanie optymalnego sterowania formułowane jest następująco: Poszukiwana jest para  $(\mathbf{y}, \mathbf{u}) \in Y \times U$ , która minimalizuje wartość funkcjonału  $J(\mathbf{y}, \mathbf{u})$

$$J(\mathbf{y}, \mathbf{u}) = \int_0^{x_f} L(\mathbf{y}, \mathbf{u}) dx \rightarrow \min, \quad (3.1)$$

z ograniczeniami, którymi są równania stanu z odpowiednimi warunkami brzegowymi, oraz ograniczenia na sterowanie

$$\begin{aligned} \mathbf{y}' &= \mathbf{f}(\mathbf{y}, \mathbf{u}), \\ \mathbf{r}_0(0) &= 0, \quad \mathbf{r}_f(x_f) = 0, \\ \mathbf{u}(\mathbf{x}) &\in U \quad \forall \quad x \in [0, x_f] \quad , \end{aligned} \quad (3.2)$$

gdzie:

$\mathbf{y}(x) \in R^{n_y}$  nazywamy zmiennymi stanu.

$\mathbf{u}(\mathbf{x}) \in R^{n_u}$  nazywamy sterowaniami.

$\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_f$  warunki brzegowe.

Warunki konieczne dla optymalnego rozwiązania wynikają z fundamentalnej zasady minimum Pontriagina [33], która ma znacznie słabsze wymagania związane ze sterowaniem. Dla dalszych zastosowań istotny jest stan odcinkowo ciągły i różniczkowalny oraz sterowanie odcinkowo ciągłe. Funkcje  $\mathbf{f} : R^{n_y} \times R^{n_u} \rightarrow R^{n_y}$ ,  $L : R^{n_y} \times R^{n_u} \rightarrow R$ ,  $\mathbf{r}_i : R^{n_y} \rightarrow R^{n_{r_i}}$  są ciągłe i różniczkowalne ze względu na  $\mathbf{y}$  i ciągłe z uwagi na  $\mathbf{u}$ .

## 3.2 Warunki konieczne optymalności

W rozdziale tym zestawione będą warunki konieczne dla zadania (3.1). Zastosowanie mnożników Lagrang'a prowadzi do funkcjonału rozszerzonego [31]:

$$J^e = \int_0^{x_f} (\lambda_0 \cdot L(\mathbf{y}, \mathbf{u}) + \lambda^T \cdot (\mathbf{f}(\mathbf{y}, \mathbf{u}) - \mathbf{y}')) dx + \sum_{i=0,f} \nu_i \cdot \mathbf{r}_i(\mathbf{y}), \quad (3.3)$$

$\lambda_0, \lambda, \nu$  - mnożniki Lagrang'a.

Mnożniki  $\nu$  można z reguły w wielu problemach wyeliminować.

### Funkcja Hamiltona, zmienne sprzężone

Mnożniki Lagrang'a  $\lambda : [0, x_f] \rightarrow R^{n_y}$  rozszerzonego funkcjonału (3.3) nazywane są **funkcjami sprzężonymi**. Funkcja postaci:

$$H(\mathbf{y}, \mathbf{u}, \lambda) = L(\mathbf{y}, \mathbf{u}) + \lambda^T \cdot \mathbf{f}(\mathbf{y}, \mathbf{u}), \quad (3.4)$$

definiowana jest jako funkcja Hamiltona.

Przy pomocy funkcji Hamiltona można sformułować problem brzegowy, który jest rozwiązaniem zadania (3.1).

$$\begin{aligned} \mathbf{y}' &= \mathbf{f}(\mathbf{y}, \mathbf{u}) = \frac{\partial H}{\partial \lambda}, \\ \lambda' &= -\frac{\partial H}{\partial \mathbf{y}}, \\ 0 &= \frac{\partial H}{\partial \mathbf{u}} \\ \mathbf{r}_0(\mathbf{y}(0)) &= 0, \quad \mathbf{r}_f(\mathbf{y}(x_f)) = 0, \\ \lambda(0) &= -\frac{\partial r_0}{\partial \mathbf{y}_0} \nu_0, \quad \lambda(x_f) = -\frac{\partial r_f}{\partial \mathbf{y}_f} \nu_f \quad . \end{aligned} \quad (3.5)$$

Równania (3.5) tworzą tzw. kanoniczny układ równań różniczkowych.

### 3.2.1 Zasada minimum

Niech  $(\mathbf{y}^*, \mathbf{u}^*)$  będzie rozwiązaniem problemu (3.1). To istnieją mnożniki Lagrang'a  $\nu_i \in R^{n_{r_i}}, \lambda : [0, x_f] \rightarrow R^{n_y}$ , które nie znikają równocześnie, równania (3.5) są spełnione i dla prawie wszystkich  $x \in [0, x_f]$  obowiązuje [33]:

$$H(\mathbf{y}^*, \mathbf{u}^*, \lambda) = \min_{\mathbf{u} \in U} H(\mathbf{y}^*, \mathbf{u}, \lambda) \quad . \quad (3.6)$$

## 3.3 Zadania z ograniczeniami

W praktycznych zastosowaniach występują liczne ograniczenia. Wyróżnione zostaną dwa typy ograniczeń: ograniczenie zależne jawnie od sterowania i stanu układu, oraz ograniczenie zależne tylko od stanu układu [31], [32].



### 3.3.1 Ograniczenia zależne od sterowania i stanu

Sformułowanie problemu optymalizacji jest następujące:

$$\begin{aligned}
 J(\mathbf{y}, \mathbf{u}) &= \int_0^{x_f} L(\mathbf{y}, \mathbf{u}) dx \rightarrow \min \\
 \mathbf{y}' &= \mathbf{f}(\mathbf{y}, \mathbf{u}), \\
 \mathbf{r}_0(0) &= 0, \quad \mathbf{r}_f(x_f) = 0, \\
 \mathbf{u}(x) &\in U \quad \forall \quad x \in [0, x_f], \\
 \mathbf{g}(\mathbf{y}, \mathbf{u}) &\geq \mathbf{0} \quad \forall \quad x \in [0, x_f] \quad ,
 \end{aligned}
 \tag{3.7}$$

dotatkowo  $\mathbf{g} : R^{n_y} \times R^{n_u} \rightarrow R^{n_g}$ . Ograniczenie nierównościowe może być włączone do rozszerzonej funkcji Hamiltona  $H_1 = H + \mu^T \mathbf{g}(\mathbf{y}, \mathbf{u})$ . Mnożnik Lagrang'a jest w tym przypadku określony następująco:

$$\mu = \begin{cases} 0 & \text{gdy } \mathbf{g} > 0 \\ \geq 0 & \text{gdy } \mathbf{g} = \mathbf{0} \end{cases} .
 \tag{3.8}$$

Jeśli w przedziale  $[0, x_f]$  ograniczenie jest aktywne na odcinku  $[x_w, x_z]$  to warunki konieczne (3.5) są uzupełnione do postaci:

$$\begin{aligned}
 \lambda' &= -\frac{\partial H}{\partial \mathbf{y}} - \mu^T \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{y}}, \\
 0 &= \frac{\partial H}{\partial \mathbf{u}} + \mu^T \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{u}}, \\
 \mathbf{g}(\mathbf{y}, \mathbf{u}) &= \mathbf{0} \quad .
 \end{aligned}
 \tag{3.9}$$

W przypadku gdy ograniczenie jest aktywne  $\mathbf{g}(\mathbf{y}, \mathbf{u}) = \mathbf{0}$ , sterowanie optymalne  $\mathbf{u}^*$  jest wprost wyznaczone z tego warunku, zaś mnożnik Lagrang'a  $\mu$  z warunku (3.9<sub>2</sub>), przy założeniu  $\mathbf{g}_u \neq 0$ .

### 3.3.2 Ograniczenia na stan układu

Sformułowany w poprzednim punkcie problem optymalizacji (3.7) uzupełniony zostanie o dodatkowe ograniczenie zależne jawnie tylko od stanu układu  $G(y(x)) = 0$ . Z równania tego nie można wyznaczyć sterowania. Interesujący dla dalszych rozważań jest przypadek aktywności tego ograniczenia w jednym punkcie  $x_b$  [31]

$$G(y(x_b)) = 0 \quad \text{dla} \quad x_b \in [0, x_f] \quad .
 \tag{3.10}$$

Zmienna sprzężona  $\lambda(x)$  jest nieciągła w tym punkcie

$$\lambda(x_b^+) = \lambda(x_b^-) - \nu \cdot G_y(y(x_b)) \quad \nu \geq 0 \quad .
 \tag{3.11}$$

Funkcja Hamiltona jest w tym punkcie ciągła

$$H(x_b^+, y, \lambda, u) = H(x_b^-, y, \lambda, u) \quad . \quad (3.12)$$

### 3.3.3 Wewnętrzne warunki punktowe

W pracy oprócz warunków początkowo-brzegowych (3.2) formułowane są także wewnętrzne warunki punktowe

$$\psi_s(y(x_s), x_s) = 0, \quad R^{n_y} \times R \rightarrow R^{n_{rs}} \quad x_s \in [0, x_f] \quad . \quad (3.13)$$

Uwzględnienie warunku (3.13) skutkuje dodatkowym warunkiem, który spełnić musi funkcja sprzężona

$$\lambda(x_s) = \nu_s^T \cdot \frac{\partial \psi_s(y(x_s), x_s)}{\partial y(x_s)} \quad . \quad (3.14)$$

Wewnętrzne warunki punktowe są bardzo istotne w tej pracy, jeśli założyć, że w punkcie  $x_s$  zmienna stanu ma ustaloną wartość, to funkcja sprzężona odpowiadająca tej wartości jest nieciągła, jeśli nie ma żadnego warunku na zmienną stanu w tym punkcie to odpowiadająca zmienna sprzężona jest w tym punkcie równa zero.

$$\begin{aligned} y_i(x_s) & \text{ jest dowolny} & \lambda_i(x_s) & = 0, \\ y_i(x_s) & \text{ ma ustaloną wartość} & \lambda_i(x_s^+) & = \lambda_i(x_s^-) + C_i \quad . \end{aligned} \quad (3.15)$$

### 3.3.4 Funkcje celu

Przyjęta w sformułowaniu (3.1) funkcja celu jest całkowym wskaźnikiem jakości, a związane z nią zadanie optymalizacji określane jest jako problem Lagrang'a. W pracy problem Lagrang'a jest sformułowany jako zadanie Mayera przez następującą transformację:

$$\begin{aligned} y'_{n_{y+1}} & = L(y, u, x), \\ y_{n_{y+1}}(0) & = 0, \\ y_{n_{y+1}} & \rightarrow \min \quad . \end{aligned} \quad (3.16)$$

Zwiększa się liczba równań stanu o jeden ze stosownym warunkiem początkowym, minimalizacji podlega natomiast zmienna stanu  $y_{n_{y+1}}$ .

W pracy rozważana jest także funkcja celu postaci:

$$J(y, u) = \max_x M(y, u) \quad , \quad (3.17)$$

która może być sprowadzona do postaci Mayera przez wprowadzenie parametru sterowania  $p$  [6],[7],[32].

$$\begin{aligned} p & = \max_x M(y, u) \\ p' & = 0, \quad p - M(y, u) \geq 0, \quad \min_u p! \end{aligned} \quad (3.18)$$

### 3.4 Programy numeryczne

Do numerycznego rozwiązania sformułowanych w pracy problemów optymalnego sterowania służy program `dircol-2.1` (A Direct Collocation Method for the Numerical Solution of Optimal Control Problems), którego autorem jest Prof. Oskar von Stryk z TU Darmstadt [40]. Program ten jest skutecznym i dobrym narzędziem do rozwiązywania zadań optymalnego sterowania z ograniczeniami. W programie tym istnieją określone procedury numeryczne, które służą do opisu sformułowanego zadania. Zasadnicza komunikacja pomiędzy użytkownikiem, a blokiem obliczeniowym jest możliwa przez trzy podstawowe podprogramy: `user.f`, `DATDIM`, `DATLIM`, które opcjonalnie muszą być zajęte przez użytkownika.

Nazawa zbioru	Treść
	Zbiory wejściowe, niezbędne:
<code>DATDIM</code>	wymiary zadania, dyskretyzacja, żądana dokładność
<code>DATLIM</code>	warunki brzegowe w punkcie początkowym, końcowym, wartość ograniczające dla $y, U, p, x_s$
	Zbiory wejściowe, opcjonalne
<code>GDATX</code>	zmienne stanu (zbiór wyjściowy programu <code>dircol</code> )
<code>GDATU</code>	sterowanie i parametry sterowania (zbiór wyjściowy programu <code>dircol</code> )

Zasadnicze podprogramy (subroutines), za pomocą których opisany zostanie model matematyczny optymalizowanego obiektu zamieszczone zostały w podprogramie `user.f`:

Podprogramy	Treść
<code>DIRCOM</code>	definiuje dane (Common)
<code>USRSTV</code>	podaje wartości startowe dla $y, u, p$ , oraz granice faz
<code>USROBJ</code>	definiuje funkcję celu
<code>USRDEQ</code>	określa prawe strony równań stanu
<code>USRNBC</code>	opisuje nieliniowe warunki brzegowe i wewnętrzne warunki punktowe
<code>USRNIC</code>	nierównościowe warunki ograniczające
<code>USRNEC</code>	równościowe warunki ograniczające

Wszystkie wyżej wymienione podprogramy, a dotyczące omawianego w rozdziale piątym problemu optymalnego kształtowania zostały zebrane i szczegółowo przedstawione w załączniku D-1.

# Rozdział 4

## Optymalizacja łuków ciągłych

Rozdział ten dotyczy optymalnego kształtowania łuków ciągłych, które mają zmienny, wzdłuż długości, przekrój poprzeczny. Przyjęto przekrój łuku prostokątny żelbetowy o zmiennej wysokości. Warunki ograniczające dotyczą wymiarów przekroju poprzecznego, jak również całkowitej objętości pręta. Funkcją celu jest maksymalne ugięcie, maksymalne naprężenie lub objętość. Na podstawie zasady minimum (3.6) zestawiono warunki konieczne optymalizacji, które tworzą wielopunktowy problem brzegowy (WPPB). WPPB można rozwiązać tylko na drodze numerycznej. Zamieszczono rozwiązania optymalne dla wybranego przykładu, którym jest trójprzęsłowy łuk paraboliczny. Dyskutowane są także korzyści wynikające z optymalizacji.

### 4.1 Kształtowanie na minimum maksymalnego ugięcia

Formułujemy obecnie ogólne zadanie optymalnego kształtowania wieloprzęsłowych łuków sprężystych o zmiennym przekroju poprzecznym. Łuki o wybranej osi kształtowane są na minimum maksymalnego przemieszczenia przy różnych ograniczeniach. Stosując zasadę minimum, zadanie optymalizacji sprowadzono do rozwiązania wielopunktowego problemu brzegowego (WPPB) dla układu równań różniczkowych. Metody numeryczne wykorzystujące pośrednią metodę strzałów wielokrotnych służą do rozwiązania WPPB. Wyznaczenie rzeczywistego rozkładu zmiennej decyzyjnej (sterowania) stało się możliwe dzięki podejściu hybrydowemu, które jest połączeniem metody kolokacji z pośrednią metodą strzałów wielokrotnych.

#### 4.1.1 Pręty zakrzywione w płaszczyźnie sił

Pręty zakrzywione w płaszczyźnie sił o znanej osi: np. parabolicznej o zmiennym przekroju poprzecznym: prostokątnym obciążone zewnętrznie, kształtowane są na minimum maksymalnego przemieszczenia przy różnych ograniczeniach. Pręt obciążony jest ciężarem własnym  $\gamma$

i ustalonym obciążeniem użytkowym  $p_0, q_0$ .

Równania stanu pręta zakrzywionego są następujące [29],[41],[42]:

$$\begin{aligned}
 \frac{dw}{d\xi} &= \frac{u|y''|l}{1+y'^2} - \beta\sqrt{1+y'^2}, \\
 \frac{d\beta}{d\xi} &= \frac{m\sqrt{1+y'^2}}{U^3}, \\
 \frac{dm}{d\xi} &= t\sqrt{1+y'^2}, \\
 \frac{dt}{d\xi} &= \frac{-nl|y''|}{1+y'^2} - \frac{\gamma l^3 F(\xi)}{EJ_0} - \frac{(p_0 + s_0)y'^2}{\sqrt{1+y'^2}}, \\
 \frac{du}{d\xi} &= \frac{nJ_0\sqrt{1+y'^2}}{F(\xi)l^2} - \frac{wly'}{1+y'^2}, \\
 \frac{dn}{d\xi} &= \frac{tl|y''|}{1+(y'^2)} + \frac{\gamma l^3 F(\xi)y'}{EJ_0} + \frac{(p_0 - s_0)y'}{\sqrt{1+y'^2}},
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

gdzie:

$\gamma$  - ciężar własny,

$l$  - rozpiętość łuku,

$E$  - moduł Younga,

$J_0 = \frac{b_0 h_0^3}{12}$  - moment bezwładności,

$F(\xi) = b_0 h_0 U$  - pole przekroju poprzecznego,

$\xi = \frac{x}{l}$  - bezwymiarowa zmienna niezależna,

$n = \frac{Nl^2}{EI_0}$  - bezwymiarowa siła podłużna,

$t = \frac{Ql^2}{EI_0}$  - bezwymiarowa siła poprzeczna,

$m = \frac{Ml}{EI_0}$  - bezwymiarowy moment zginający,

$u = \frac{\bar{u}}{l}$  - bezwymiarowe przemieszczenie styczne do osi łuku,

$w = \frac{\bar{w}}{l}$  - bezwymiarowe przemieszczenie normalne do osi łuku,

$\beta$  - kąt ugięcia,

$U = \frac{h}{h_0}$  sterowanie - bezwymiarowa wysokość,

$y(\xi)$  - zadane równanie osi łuku,

$p_0 = \frac{Pl^3}{EI_0}$  - obciążenie użytkowe pionowe,

$q_0 = \frac{Sl^3}{EI_0}$  - obciążenie użytkowe poziome.

Równania (4.1) nazywamy równaniami stanu i zapiszemy je w postaci kanonicznej  $y'(\xi) = f(\xi, U, y)$ . Założymy przekrój prostokątny i paraboliczną oś łuku

$$\begin{aligned}
 y'_1 &= \frac{8a_1 y_5}{Z_i} - y_2 \sqrt{Z_i} \\
 y'_2 &= \frac{y_3 \sqrt{Z_i}}{U^3}, \\
 y'_3 &= y_4 \sqrt{Z_i}, \\
 y'_4 &= \frac{-8a_1 y_6}{Z_i} - a_2 U - \frac{p_0 + q_0(16a_1^2(1-2\xi)^2)}{\sqrt{Z_i}}, \\
 y'_5 &= \frac{y_6 a_3 \sqrt{Z_i}}{U} - \frac{8a_1 y_1}{Z_i}, \\
 y'_6 &= \frac{8a_1 y_4}{Z_i} + a_2 U 4a_1(1-2\xi) + \frac{(p_0 - q_0)4a_1(1-2\xi)}{\sqrt{Z_i}}, \\
 y'_7 &= U(\xi)\sqrt{Z_i}, \\
 Z_1 &= 1 + 16a_1^2((1-2\xi)^2) \quad \text{gdy } \xi \in (0,1) \\
 Z_2 &= 1 + 16a_1^2((3-2\xi)^2) \quad \text{gdy } \xi \in (1,2) \\
 Z_3 &= 1 + 16a_1^2((5-2\xi)^2) \quad \text{gdy } \xi \in (2,3) \quad ,
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

gdzie:

$y_1 = w, y_2 = \beta, y_3 = m, y_4 = t, y_5 = u, y_6 = n, y_7 = \text{objętość}$ ,

$$a_1 = \frac{f}{l}, \quad a_2 = \frac{\gamma l^3 b_0 h_0}{EI_0}, \quad a_3 = \frac{I_0}{b_0 h_0 l^2} \quad . \tag{4.3}$$

Optymalizowany łuk trójprzęsłowy jest na lewym końcu podparty przegubowo, na prawym końcu łuk pozostaje utwierdzony. Warunki brzegowe są następujące:

$$\begin{aligned}
 y_1(0) &= 0, & y_3(0) &= 0, & y_5(0) &= 0, & y_7(0) &= 0, \\
 y_1(1) &= 0, & y_2(1) &= 0, & y_5(1) &= 0 \quad .
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

Ponadto łuk posiada dwie podpory pośrednie usytuowane w punktach  $\xi_{p1} = 1, \xi_{p2} = 2$ . W punktach przyłożenia podpór nieciągłe pozostają siła podłużna i poprzeczna, wartości skoków w tych punktach określają stałe  $C_1, C_2, C_3, C_4$ . Na podporach pośrednich ciągłe są moment zginający i kąt ugięcia. Podpory pośrednie charakteryzują zatem następujące wewnętrzne

warunki punktowe

$$\begin{aligned}
 y_1(1) = 0, \quad y_2(1^+) = y_2(1^-), \quad y_3(1^+) = y_3(1^-), \quad y_4(1^+) = y_4(1^-) + C_1, \\
 y_5(1) = 0, \quad y_6(1^+) = y_6(1^-) + C_2, \\
 y_1(2) = 0, \quad y_2(2^+) = y_2(2^-), \quad y_3(2^+) = y_3(2^-), \quad y_4(2^+) = y_4(2^-) + C_3, \\
 y_5(2) = 0, \quad y_6(2^+) = y_6(2^-) + C_4 \quad .
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

Równania (4.1), (4.2) z warunkami brzegowymi (4.4) i wewnętrznymi warunkami punktowymi (4.5) opisują w sposób pełny zadanie analizy łuku trójprzęsłowego obciążonego zewnątrz z uwzględnieniem ciężaru własnego, przy założeniu, że kształt przekroju poprzecznego łuku jest ustalony.

### 4.1.2 Sformułowanie problemu

Ugięcie łuku wieloprzęsłowego zależy w sposób istotny od zmiany przekroju poprzecznego wzdłuż jego osi. W pracy podjęto próbę takiego przyjęcia przekroju poprzecznego dla którego ugięcia łuku będą najmniejsze. Minimalizacji podlega maksymalne przemieszczenie łuku, obciążonego ciężarem własnym  $\gamma$  i zadaniem obciążeniem użytkowym  $p_0, q_0$ . Funkcją celu, która jest minimalizowana w niniejszej pracy jest maksymalne przemieszczenie osi łuku (uwzględnione zostaną przemieszczenia styczne  $u$  i normalne  $w$ )

$$J(U) = \max \sqrt{(u^2 + w^2)} \quad . \tag{4.6}$$

Uwzględniając przyjęte wcześniej oznaczenia funkcjonał (4.6) zapiszemy ostatecznie następująco:

$$J(U) = \max \sqrt{(y_1^2 + y_5^2)} \quad . \tag{4.7}$$

W rozdziale tym przyjmujemy funkcję celu w postaci (4.7). Zadanie optymalizacji z tym funkcjonałem można sprowadzić jak pokazano w (3.18) do problemu Mayera wprowadzając parametr sterowania  $p$ . Zadanie Mayera ma postać:

$$\begin{aligned}
 J(U, p) = p &\Rightarrow \min! \\
 &\text{z dodatkowym ograniczeniem} \\
 g_1(y, U, p) &\geq 0 \\
 p &= \max \sqrt{(y_1^2 + y_5^2)} \\
 g_1 = p - \sqrt{(y_1^2 + y_5^2)} &\geq 0 \quad .
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

Dla założonego sterowania, którym jest bezwymiarowa wysokość przekroju prostokątnego  $U(\xi)$  uwzględniono ograniczenia w postaci:

$$U_1 \leq U(\xi) \leq U_2 \quad . \quad (4.9)$$

Aby wykazać jakie korzyści otrzymujemy z optymalizacji wprowadza się dodatkowe ograniczenie: jest nim ustalona objętość łuku ( ustalona ilość materiału którą mamy do dyspozycji)

$$\begin{aligned} y_7 &= \int_0^\xi U(\xi) \sqrt{Z_i} d\xi, \quad y_7' = U(\xi) \sqrt{Z_i}, \\ y_7(0) &= 0, \quad y_7(3) = V_0 \quad . \end{aligned} \quad (4.10)$$

Zadanie optymalnego kształtowania polega na wyznaczeniu takiego przebiegu wysokości przekroju poprzecznego łuku (sterowania) wzdłuż jego długości, która spełniając warunki ograniczające (4.4), (4.6), (4.8), (4.9), (4.10) zapewnia minimum funkcjonału

$$\min_U \{ \max_\xi \sqrt{(y_1^2 + y_5^2)} \} \quad . \quad (4.11)$$

### 4.1.3 Warunki konieczne

Teoria optymalnego sterowania pozwala sformułować warunki konieczne optymalnej trajektorii  $\overline{y(\xi)}$  i związanego z nią sterowania  $U(\xi)$  [5]. Sterowania  $U(\xi)$  wyznaczono z zasady minimum. Definiujemy funkcję Hamiltona  $H(y, \lambda, U, \xi)$

$$\begin{aligned} H &= \sum_i \lambda_i \cdot y_i' \quad \text{dla } g_1(y, U, p) > 0 \\ H_1 &= H + \mu \cdot g_1(y, U, p) \quad \text{gdy } g_1(y, U, p) = 0 \\ H\{y(\xi), \lambda(\xi), U(\xi)\} &= \max_V H\{y(\xi), \lambda(\xi), V\} \\ \text{dla wszystkich } \xi &\in [0, 3]. \end{aligned} \quad (4.12)$$

Dla łuku trójprzęsłowego funkcja Hamiltona  $H$  ma następującą postać:  
Pierwszy przedział charakterystyczny  $\xi \in [0, 1]$ ,

$$\begin{aligned} H &= \lambda_1 \cdot \left\{ \frac{8a_1 y_5}{Z_1} - y_2 \sqrt{Z_1} \right\} + \lambda_2 \cdot \left\{ \frac{y_3 \sqrt{Z_1}}{U^3} \right\} + \lambda_3 \cdot \left\{ y_4 \sqrt{Z_1} \right\} \\ &+ \lambda_4 \cdot \left\{ \frac{-8a_1 y_6}{Z_1} - a_2 U - \frac{p_0 + q_0 (16a_1^2 (1 - 2\xi)^2)}{\sqrt{Z_1}} \right\} + \lambda_5 \cdot \left\{ \frac{y_6 a_3 \sqrt{Z_1}}{U} - \frac{8a_1 y_1}{Z_1} \right\} + \\ &\lambda_6 \cdot \left\{ \frac{8a_1 y_4}{Z_1} + a_2 U 4a_1 (1 - 2\xi) + \frac{(p_0 - q_0) 4a_1 (1 - 2\xi)}{\sqrt{Z_1}} \right\} + \lambda_7 \cdot \left\{ U(\xi) \sqrt{Z_1} \right\} + \mu (p - \sqrt{(y_1^2 + y_5^2)}), \end{aligned} \quad (4.13)$$



drugi przedział charakterystyczny  $\xi \in [1, 2]$ ,

$$\begin{aligned}
H = & \lambda_1 \cdot \left\{ \frac{8a_1y_5}{Z_2} - y_2\sqrt{Z_2} \right\} + \lambda_2 \cdot \left\{ \frac{y_3\sqrt{Z_2}}{U^3} \right\} + \lambda_3 \cdot \{y_4\sqrt{Z_2}\} \\
& + \lambda_4 \cdot \left\{ \frac{-8a_1y_6}{Z_2} - a_2U - \frac{p_0 + q_0(16a_1^2(3 - 2\xi)^2)}{\sqrt{Z_2}} \right\} + \lambda_5 \cdot \left\{ \frac{y_6a_3\sqrt{Z_2}}{U} - \frac{8a_1y_1}{Z_2} \right\} + \\
& \lambda_6 \cdot \left\{ \frac{8a_1y_4}{Z_2} + a_2U4a_1(3 - 2\xi) + \frac{(p_0 - q_0)4a_1(3 - 2\xi)}{\sqrt{Z_2}} \right\} + \lambda_7 \cdot \{U(\xi)\sqrt{Z_2}\} + \mu(p - \sqrt{(y_1^2 + y_5^2)}),
\end{aligned} \tag{4.14}$$

trzeci przedział charakterystyczny  $\xi \in [2, 3]$ ,

$$\begin{aligned}
H = & \lambda_1 \cdot \left\{ \frac{8a_1y_5}{Z_3} - y_2\sqrt{Z_3} \right\} + \lambda_2 \cdot \left\{ \frac{y_3\sqrt{Z_3}}{U^3} \right\} + \lambda_3 \cdot \{y_4\sqrt{Z_3}\} \\
& + \lambda_4 \cdot \left\{ \frac{-8a_1y_6}{Z_3} - a_2U - \frac{p_0 + q_0(16a_1^2(5 - 2\xi)^2)}{\sqrt{Z_3}} \right\} + \lambda_5 \cdot \left\{ \frac{y_6a_3\sqrt{Z_3}}{U} - \frac{8a_1y_1}{Z_3} \right\} + \\
& \lambda_6 \cdot \left\{ \frac{8a_1y_4}{Z_3} + a_2U4a_1(5 - 2\xi) + \frac{(p_0 - q_0)4a_1(5 - 2\xi)}{\sqrt{Z_3}} \right\} + \lambda_7 \cdot \{U(\xi)\sqrt{Z_3}\} + \mu(p - \sqrt{(y_1^2 + y_5^2)}).
\end{aligned} \tag{4.15}$$

Optymalne rozwiązanie  $U = U(\xi)$  wyznaczymy w szczególności z warunku

$$\begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial U} &= 0, \\ 4\lambda_1 a_1 a_2 (1 - 2\xi) - \lambda_4 a_2 - \frac{\lambda_5 y_6 a_3 \sqrt{Z_1}}{U^2} - \frac{3\lambda_2 y_3 \sqrt{Z_1}}{U^4} + \lambda_7 \sqrt{Z_1} &= 0 \\ \text{dla wszystkich } \xi &\in [0, 1], \\ 4\lambda_1 a_1 a_2 (3 - 2\xi) - \lambda_4 a_2 - \frac{\lambda_5 y_6 a_3 \sqrt{Z_2}}{U^2} - \frac{3\lambda_2 y_3 \sqrt{Z_2}}{U^4} + \lambda_7 \sqrt{Z_2} &= 0 \\ \text{dla wszystkich } \xi &\in [1, 2], \\ 4\lambda_1 a_1 a_2 (5 - 2\xi) - \lambda_4 a_2 - \frac{\lambda_5 y_6 a_3 \sqrt{Z_3}}{U^2} - \frac{3\lambda_2 y_3 \sqrt{Z_3}}{U^4} + \lambda_7 \sqrt{Z_3} &= 0 \\ \text{dla wszystkich } \xi &\in [2, 3]. \end{aligned} \tag{4.16}$$

Funkcje sprzężone  $\lambda_i$  są rozwiązaniem równania:

$$\lambda'_i = -\frac{\partial H}{\partial y_i}. \tag{4.17}$$

Dla łuku parabolicznego postać równań sprzężonych (4.16) jest następująca:

$$\begin{aligned} \lambda'_1 &= \frac{8a_1 \lambda_5}{Z_j} + \frac{\mu y_1}{\sqrt{y_1^2 + y_5^2}}, \\ \lambda'_2 &= \lambda_1 \sqrt{Z_j}, \\ \lambda'_3 &= -\frac{\lambda_2 \sqrt{Z_j}}{U^3}, \\ \lambda'_4 &= -\lambda_3 \sqrt{Z_j} - \frac{8a_1 \lambda_6}{Z_j}, \\ \lambda'_5 &= -\frac{8a_1 \lambda_1}{Z_j} + \frac{\mu y_5}{\sqrt{y_1^2 + y_5^2}}, \\ \lambda'_6 &= +\frac{8a_1 \lambda_4}{Z_j} - \frac{a_3 \lambda_5 \sqrt{Z_j}}{U}, \\ \lambda'_7 &= 0, \quad j = 1, 2, 3. \end{aligned} \tag{4.18}$$

Warunki brzegowe dla funkcji sprzężonych  $\lambda_i$  wynikają z warunków transwersalności

$$\begin{aligned} \lambda_2(0) &= 0, & \lambda_4(0) &= 0, & \lambda_6(0) &= 0 \\ \lambda_3(3) &= 0, & \lambda_4(3) &= 0, & \lambda_6(3) &= 0 \quad . \end{aligned} \tag{4.19}$$

Funkcje sprzężone  $\lambda_1, \lambda_5$  pozostają nieciągłe na podporach pośrednich

$$\begin{aligned}\lambda_1(1^+) &= \lambda_1(1^-) + B_1, \\ \lambda_5(1^+) &= \lambda_5(1^-) + B_2, \\ \lambda_1(2^+) &= \lambda_1(2^-) + B_3, \\ \lambda_5(2^+) &= \lambda_5(2^-) + B_4.\end{aligned}\tag{4.20}$$

Funkcja Hamiltona  $H$  jest nieciągła na podporach pośrednich, gdy ich położenia są ustalone.

$$\begin{aligned}H(1^+, y, \lambda, U) &= H(1^-, y, \lambda, U) + \sigma_1, \\ H(2^+, y, \lambda, U) &= H(2^-, y, \lambda, U) + \sigma_2.\end{aligned}\tag{4.21}$$

Warunki konieczne optymalizacji (4.4), (4.5), (4.6), (4.7), (4.16), (4.18), (4.19), (4.20) zestawione na podstawie zasady minimum budują Wielopunktowy Problem Brzegowy (WPPB). Niewiadomymi w analizowanym problemie są:

1. 7 zmiennych stanu  $y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, y_7$ ,
2. 7 zmiennych sprzężonych  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6, \lambda_7$ ,
3. 4 stałe  $C_1, C_2, C_3, C_4$ , które są wartościami skoku sił podłużnych i poprzecznych na podporach pośrednich,
4. 4 stałe  $B_1, B_2, B_3, B_4$ , które są wartościami skoku funkcji sprzężonych na podporach,
5. 2 stałe  $\sigma_1, \sigma_2$  są nieciągłościami funkcji Hamiltona na podporach wewnętrznych, gdy ich położenie jest ustalone,
6. 4 stałe  $D_1, D_2, D_3, D_4$  są wartościami skoku funkcji sprzężonych  $\lambda_4, \lambda_5$  w nieznanym punkcie w którym ograniczenie (4.9) jest aktywne ( $g_1 = 0$ ).
7. Z góry nieznaną liczbą punktów  $\xi_i$  zmiany sterowania,  
Warto w tym miejscu podkreślić, że teoria optymalnego sterowania **nie dostarcza wielu** informacji o liczbie punktów zmiany sterowania

8. nieznaną funkcją  $\mu$ , jest różna od zera, gdy ograniczenie  $g_1 = 0$  jest aktywne.

Po zestawieniu niewiadomych i podaniu równań różniczkowych opisujących zadanie optymalnego kształtowania łuku jest oczywiste, że rozwiązanie sformułowanego zadania jest możliwe tylko na drodze numerycznej.

#### 4.1.4 Struktura sterowania

Przyjęta funkcja celu (4.8) sprawia, że struktura sterowania dla której zadanie jest zbieżne ma następującą postać:

$$U(x) = \begin{cases} U_1 & \text{gdy } x \in [0.0 \div 0.0322], \\ U_{opt} & \text{gdy } x \in [0.0322 \div 0.0967], \\ U_2 & \text{gdy } x \in [0.0967 \div 0.6129], \quad g_1 = 0, x_b = 0.4193 \\ U_{opt} & \text{gdy } x \in [0.6129 \div 0.7096], \\ U_1 & \text{gdy } x \in [0.7096 \div 0.8387], \\ U_2 & \text{gdy } x \in [0.8387 \div 1.2903], \\ U_1 & \text{gdy } x \in [1.2903 \div 1.3870], \\ U_2 & \text{gdy } x \in [1.3870 \div 1.8387], \quad g_1 = 0, x_b = 1.4838 \\ U_{opt} & \text{gdy } x \in [1.8387 \div 1.9677], \\ U_1 & \text{gdy } x \in [1.9677 \div 2.2258], \\ U_{opt} & \text{gdy } x \in [2.2258 \div 2.5483], \quad g_1 = 0, x_b = 2.5161 \\ U_1 & \text{gdy } x \in [2.5483 \div 2.7096], \\ U_{opt} & \text{gdy } x \in [2.7096 \div 2.8387], \\ U_2 & \text{gdy } x \in [2.8387 \div 3.0]. \end{cases} \quad (4.22)$$

Rozwiązanie numeryczne zamieszczono na rysunku (Rys.4.1).

## 4.2 Kształtowanie na minimum maksymalnego naprężenia normalnego

W rozdziale tym jako funkcję celu przyjęto maksymalne naprężenie normalne. Dla łuku obciążonego w płaszczyźnie sił wartość naprężenia normalnego wyznaczymy ze znanego wzoru

$$\sigma_x = \frac{|M(x)|}{W(h)} + \frac{|N(x)|}{F(h)}, \quad x \in [0, L]. \quad (4.23)$$

Funkcję celu przyjęto w postaci:

$$J(h) = \max_x \{\sigma_x\}. \quad (4.24)$$

Po wprowadzeniu wielkości bezwymiarowych

$F(U) = b_0 h_0 U$  - pole przekroju poprzecznego,

$W(U) = \frac{b_0 h_0^2}{6} U(\xi)^2$  - wskaźnik wytrzymałości,

funkcjonał ten zapiszemy w postaci:

$$\sigma_x = \frac{|y_3|}{W(U)} + \frac{|y_6|}{F(U)}, \quad x \in [0, L]. \quad (4.25)$$

Ostatecznie wyrażenie na naprężenie normalne po uwzględnieniu wielkości bezwymiarowych zapiszemy następująco:

$$\sigma_\xi = \frac{h_0}{2l} \frac{E|y_3|}{U^2} + \frac{h_0^2}{12l^2} \frac{E|y_6|}{U}, \quad \xi \in [0, 3]. \quad (4.26)$$

Zadanie optymalnego kształtowania na minimum maksymalnego naprężenia będzie następujące:

Poszukujemy sterowania  $U(\xi)$ , które realizuje minimum maksymalnego naprężenia

$$\min_U \{ \max_\xi \{ \frac{h_0}{2l} \frac{E|y_3|}{U^2} + \frac{h_0^2}{12l^2} \frac{E|y_6|}{U} \} \}, \quad \xi \in [0, 3], \quad (4.27)$$

przy ograniczeniach jak w poprzednim paragrafie (4.2, 4.4, 4.5, 4.9, 4.10).

Zwrócić należy uwagę na ważną z punktu widzenia metody okoliczność, że funkcja celu zależy jawnie od sterowania, będzie to miało istotny wpływ na wartości funkcji sprzężonych.

Wprowadzając parametr sterowania  $p$

$$p = \{ \max_\xi \{ \frac{h_0}{2l} \frac{E|y_3|}{U^2} + \frac{h_0^2}{12l^2} \frac{E|y_6|}{U} \} \}, \quad \xi \in [0, 3], \quad (4.28)$$

zadanie optymalnego kształtowania ma postać:

$$\begin{aligned} J(U, p) = p &\Rightarrow \min! \\ &\text{z dodatkowym ograniczeniem} \\ g_1(y, U, p) &\geq 0, \\ g_1 = p - \{ \frac{h_0}{2l} \frac{E|y_3|}{U^2} + \frac{h_0^2}{12l^2} \frac{E|y_6|}{U} \} &\geq 0. \end{aligned} \quad (4.29)$$

## 4.3 Kształtowanie na minimum objętości

Ważną funkcją celu, do którego odwołuje się praktyka jest objętość (ciężar) konstrukcji. Ewentualne zyski wynikające z optymalizacji a mierzone tym wskaźnikiem jakości, są przy rozważanym kryterium bardzo przekonywujące.

Objętość pręta jest całkowym wskaźnikiem jakości:

$$J(U) = \int_0^1 (\gamma b_0 h_0 U(\xi)) \sqrt{1 + 16a_1^2(1 - 2\xi)^2} d\xi + \int_1^2 (\gamma b_0 h_0 U(\xi)) \sqrt{1 + 16a_1^2(3 - 2\xi)^2} d\xi + \int_2^3 (\gamma b_0 h_0 U(\xi)) \sqrt{1 + 16a_1^2(5 - 2\xi)^2} d\xi. \quad (4.30)$$

Minimalizacji podlega funkcjonal (4.30) z dodatkowym ograniczeniem

$$\begin{aligned} |y_1(\xi)| &\leq y_{11} & \xi \in (0, 1), \\ |y_1(\xi)| &\leq y_{12} & \xi \in (1, 2), \\ |y_1(\xi)| &\leq y_{13} & \xi \in (2, 3), \end{aligned} \quad (4.31)$$

na maksymalne ugięcia. Ograniczenia (4.31) są bezpośrednio nałożone na zmienne stanu i jeśli są aktywne to tylko punktowo. Odpowiadająca zmiennej stanu  $y_5$  funkcja sprzężona  $\lambda_5$  pozostaje w tym punkcie nieciągła.

## 4.4 Rezultaty numeryczne

W rozdziale poprzednim zestawiono warunki konieczne optymalizacji dla trzech różnych funkcji celu: maksymalnego ugięcia, maksymalnego naprężenia, objętości, które tworzą tzw. Wielopunktowy Problem Brzegowy (WPPB), który może być rozwiązany **tylko** na drodze numerycznej. Wymiar WPPB ma istotne znaczenie on bowiem decyduje o trudnościach numerycznych. Do numerycznego rozwiązania sformułowanych zadań optymalnego kształtowania posłużono się profesjonalnym programem `Dircol 2.1`. Program ten służy do numerycznego rozwiązywania Wielopunktowych Problemów Brzegowych dla układu równań różniczkowych. Program ten został udostępniony przez promotora pracy.

### 4.4.1 Minimalizacja maksymalnego ugięcia

Optymalizowanym obiektem jest łuk trójprzęsłowy o ustalonej rozpiętości  $L$  i wyniosłości  $f$ . Łuk obciążony jest ciężarem własnym  $\gamma$  i obciążeniem użytkowym  $p_0, q_0$ . Przekrój łuku jest prostokątem o stałej szerokości i zmiennej wysokości.

Tab. 4.1 Dane liczbowe dla łuku trójprzęstowego

$l$	Obc. $p_0, q_0$	$f$	$E$	$b_0$	$h_0$	$\gamma$
[m]	$[\frac{KN}{m}]$	[m]	$[\frac{KN}{m^2}]$	[m]	[m]	$[\frac{KN}{m^3}]$
$l = 3 \cdot 53,0$	$p_0 = 9,0$ $q_0 = 3,0$	13,5	$39000,0 \cdot 10^3$	1,0	1,0	25,0

W tabeli poniżej zestawiono wyniki optymalne i wyniki dla stałego przekroju poprzecznego

Tab. 4.2 Wyniki optymalizacji dla funkcji celu (4.7)

$U(\xi)$	$\xi_1$	$\xi_2$	$\xi_3$	$p = J(U)$	$V_0$
$U_{opt}$	0,4193	1,4838	2,5161	0,009145	2,46
$U = 1,0$	0,451612	-	-	0,013996	3,00
$U = 0,82$	0,451612			0,027771	2,46

Porównując maksymalne przemieszczenie dla przekroju optymalnego i przekroju stałego  $U = 1,0$  otrzymujemy zysk około 35%. Jeśli uwzględnić te same objętości to zysk ten jest jeszcze większy i wynosi 67%. W wyniku optymalnego rozkładu masy zmniejszono maksymalne ugięcie **trzykrotnie** przy tej samej objętości.

$\xi_1, \xi_2, \xi_3$  - punkty w których ugięcie jest maksymalne

#### 4.4.2 Minimalizacja maksymalnego naprężenia normalnego

Wyniki optymalizacji dla funkcji celu (4.27) zestawiono w tabeli 4.3

Tab. 4.3 Wyniki optymalizacji dla funkcji celu (4.27)

$U(\xi)$	$\xi_1$	$\xi_2$	$\xi_3$	$p = J(U)$	$V_0$
$U_{opt}$	0,419354	$\xi \in (0,871 - 1,000)$	-	1,806072	2,46
$U = 0,82$	1,000			3,313647	2,46

Można zauważyć, że ograniczenie (4.29) zależy jawnie od sterowania, to znaczy, że jest aktywne nie tylko punktowo ale także w pewnym przedziale co zostało potwierdzone numerycznie. W wyniku optymalizacji obniżono wartość maksymalnego naprężenia o 46% przy tej samej objętości.

#### 4.4.3 Minimalizacja objętości

Dla tej funkcji celu zestawiono wyniki optymalizacji w tabeli 4.4

Tab. 4.4 Wyniki optymalizacji dla funkcji celu (4.30)

$U(\xi)$	$\xi_1$	$\xi_2$	$\xi_3$	$V_{opt}$
$U_{opt}$	0,419354	1,548387	2,451612	1,957630
$U = 1,00$				3,000

Minimalizacji objętości dokonujemy przy ograniczeniach na maksymalne ugięcie, następuje redukcja objętości o 35%. Ograniczenia na maksymalne ugięcie są aktywne w punktach  $\xi_1, \xi_2, \xi_3$  ( $|w| \leq 0,013996$ ).

## 4.5 Uwagi

Analizowano trzy różne kryteria optymalizacji w kolejności: maksymalne ugięcie, maksymalne naprężenie, objętość przy ograniczonym ugięciu (Rys.4.1).

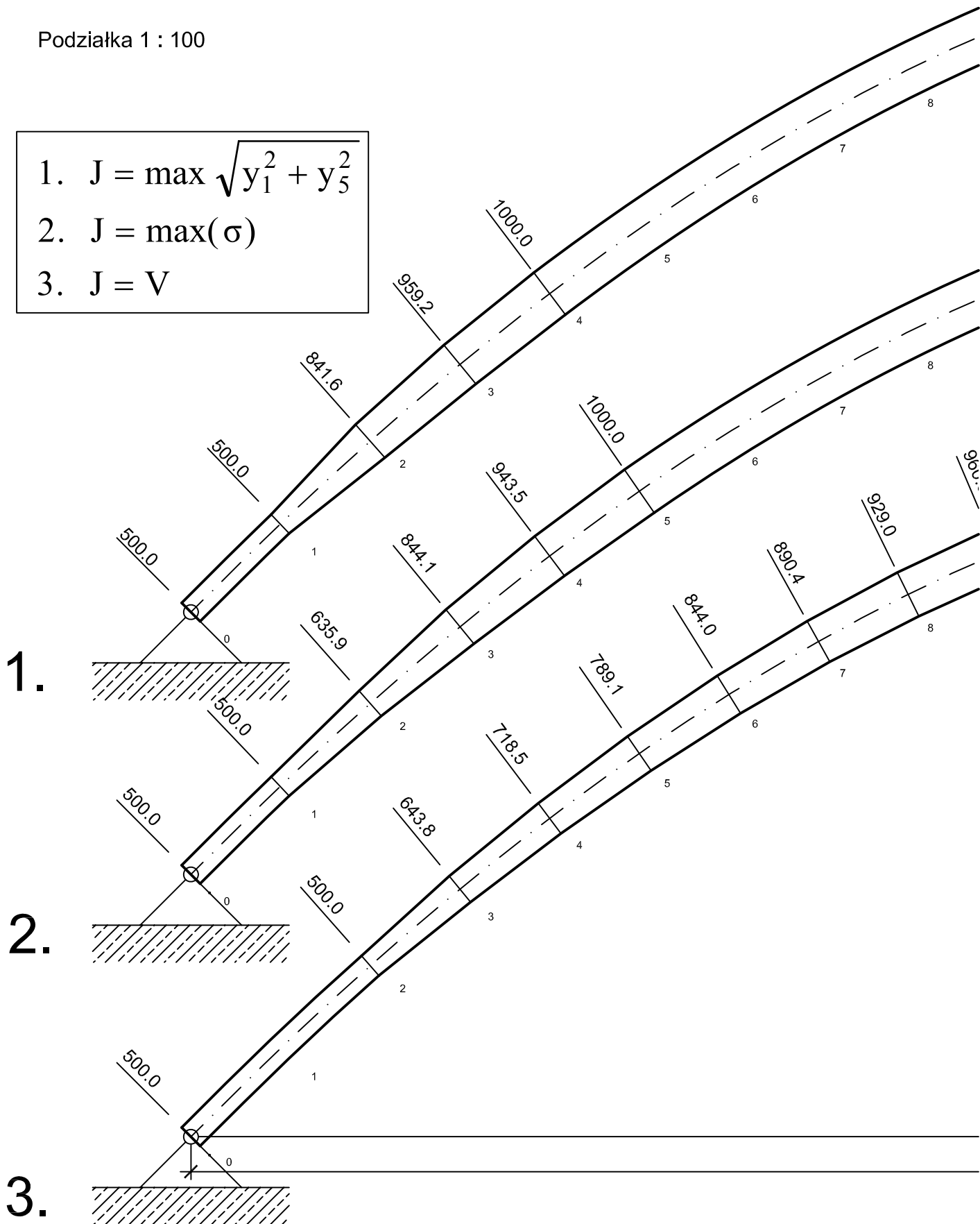
Optymalizacja ze względu na maksymalne ugięcie zmniejsza wartość tego ugięcia o 52%. Zysk ten jest znaczny ale mało przekonujący i trudny do marketingowego wyeksponowania. Podobnie jest z funkcją celu którą jest maksymalne naprężenie. Do wyobraźni przemawia natomiast zdecydowanie minimalizacja objętości konstrukcji, otrzymany zysk na objętości to 35%. przy utrzymaniu tych samych ugięć. Zużyjemy na budowę wiaduktu znacznie mniej materiału, co nie trudno przeliczyć na zysk finansowy.

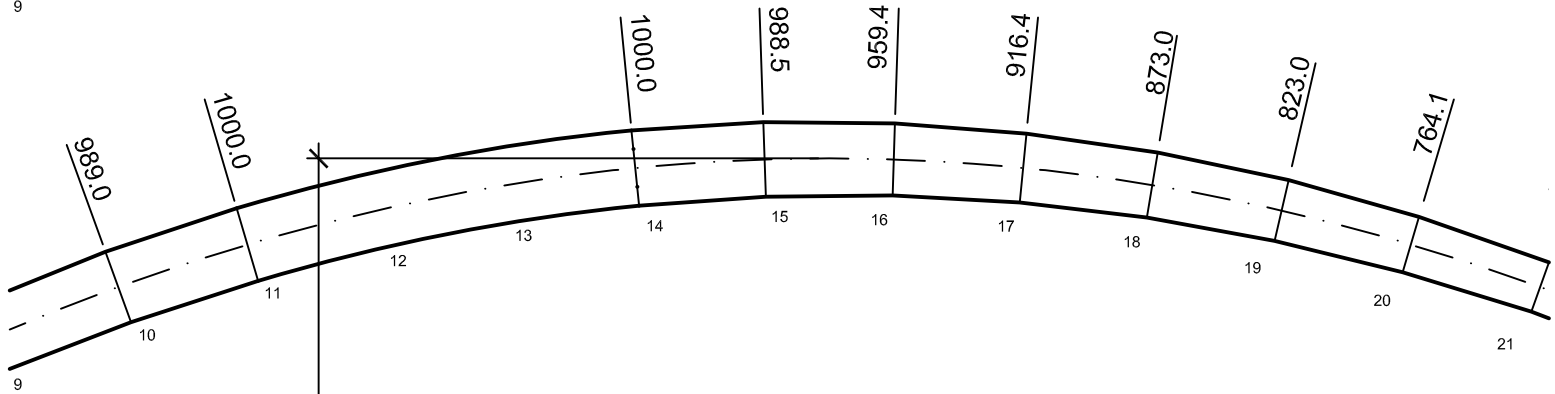
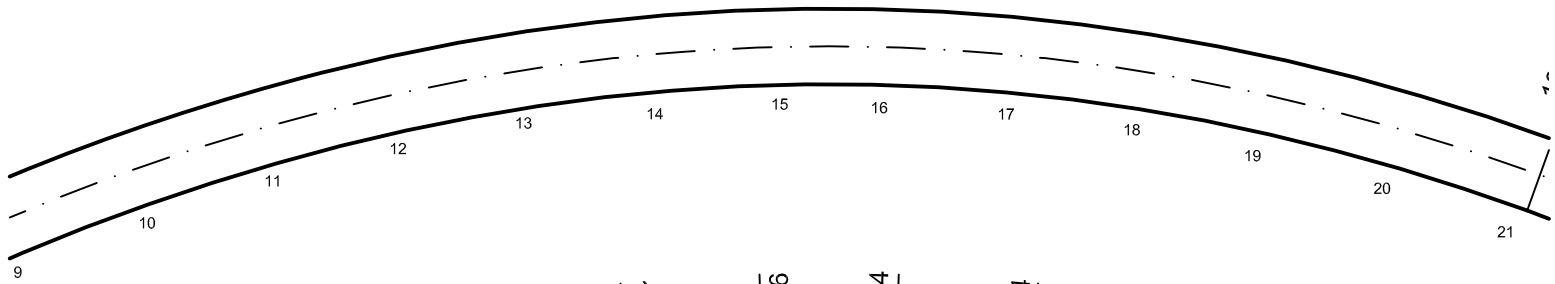
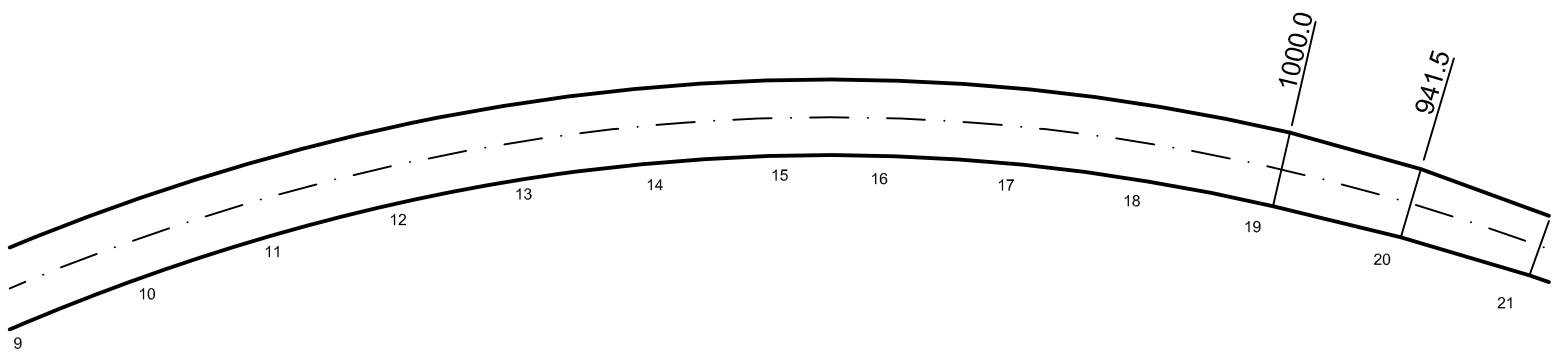


# Rozwiązanie zadań optymalizacji z różnymi funkcjami celu

Podziałka 1 : 100

1.  $J = \max \sqrt{y_1^2 + y_5^2}$
2.  $J = \max(\sigma)$
3.  $J = V$

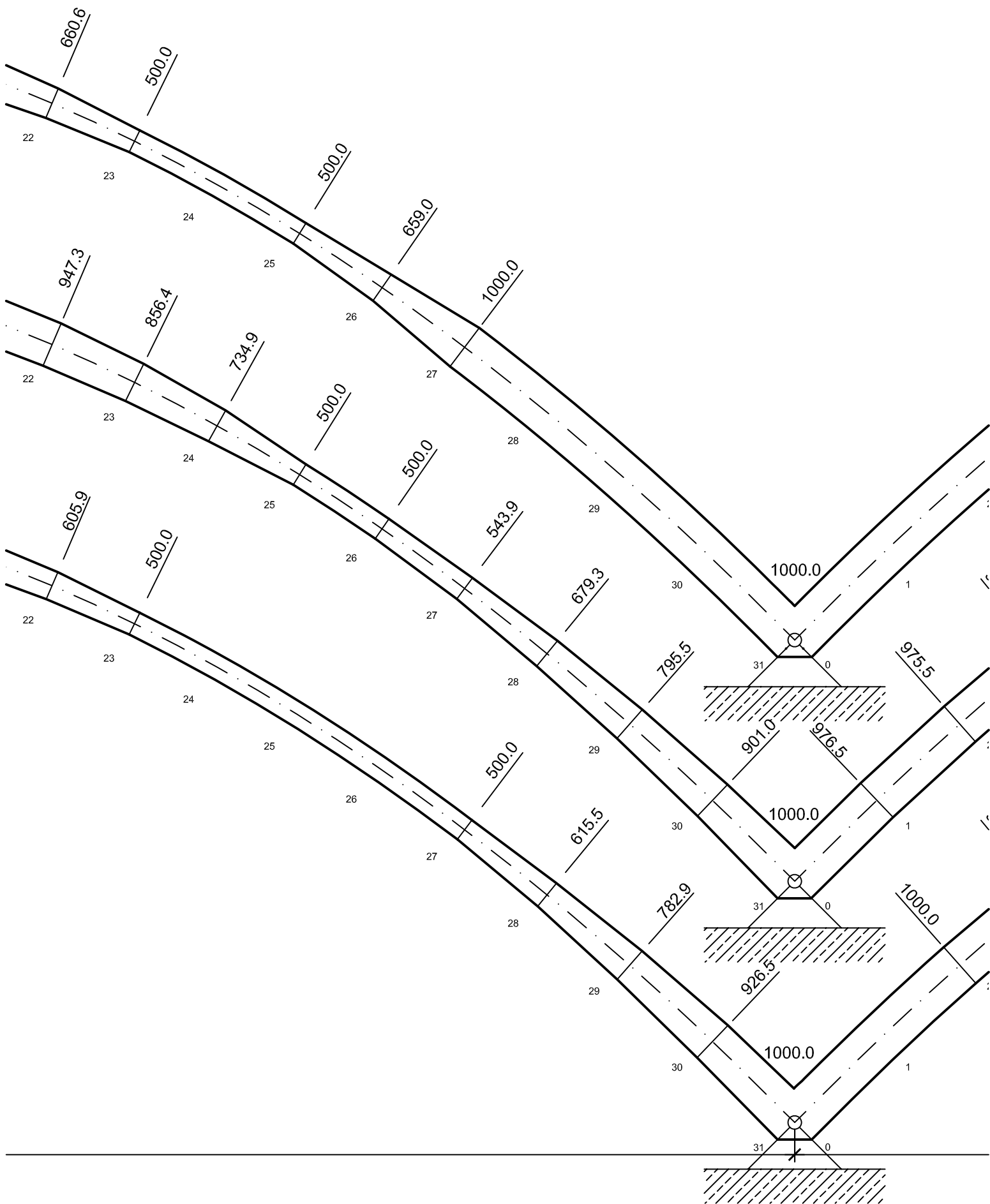


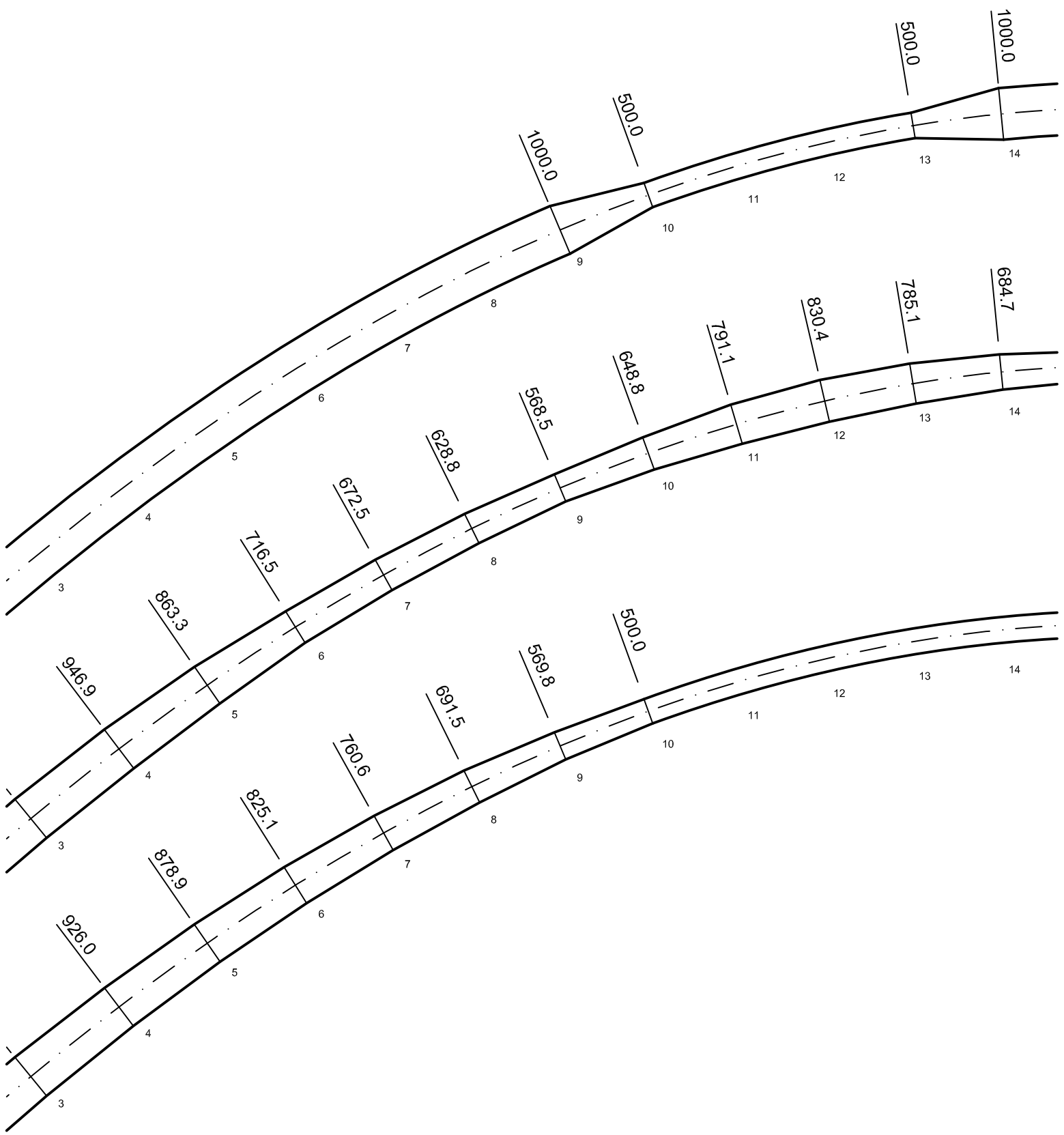


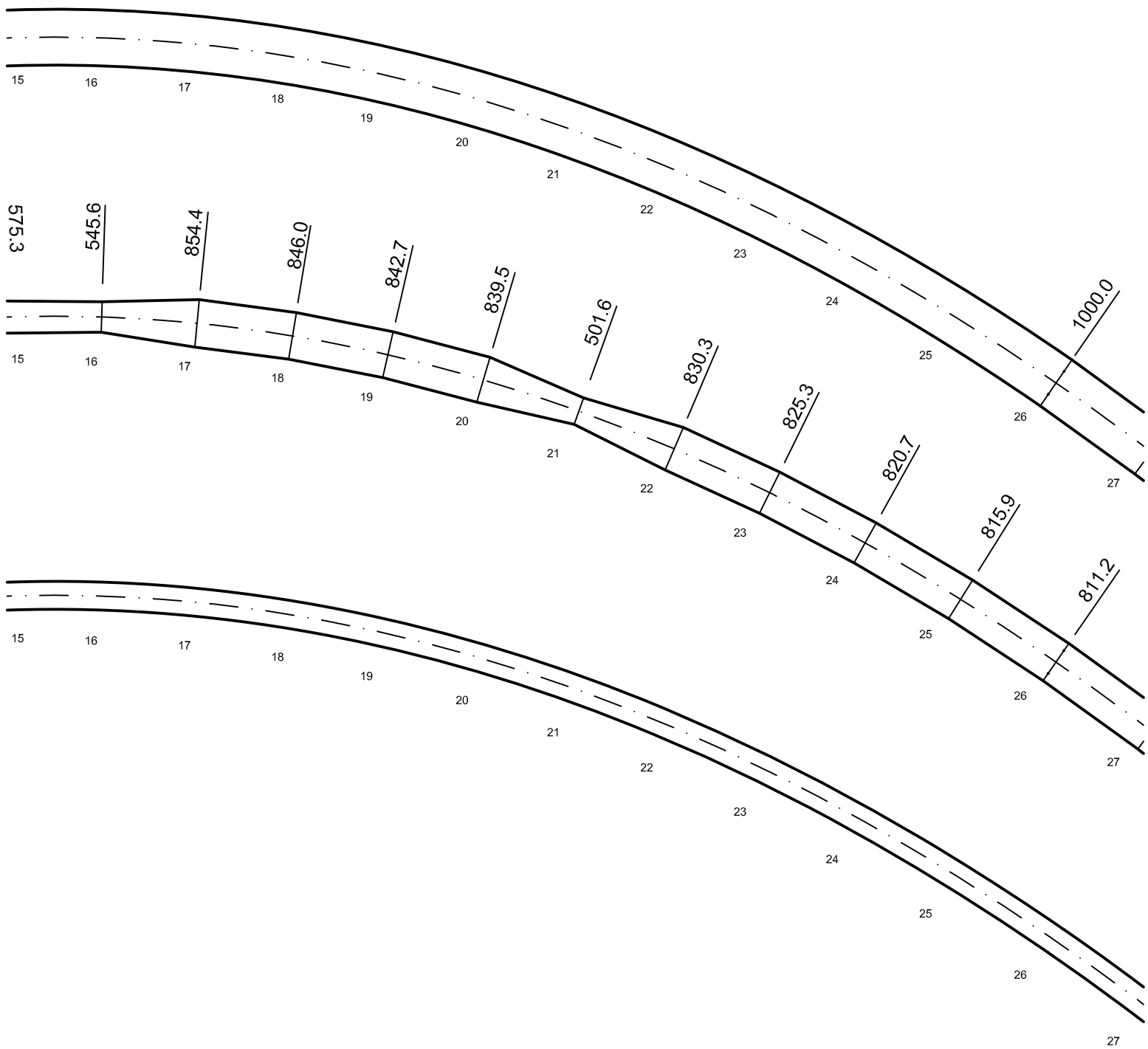
13500

53000



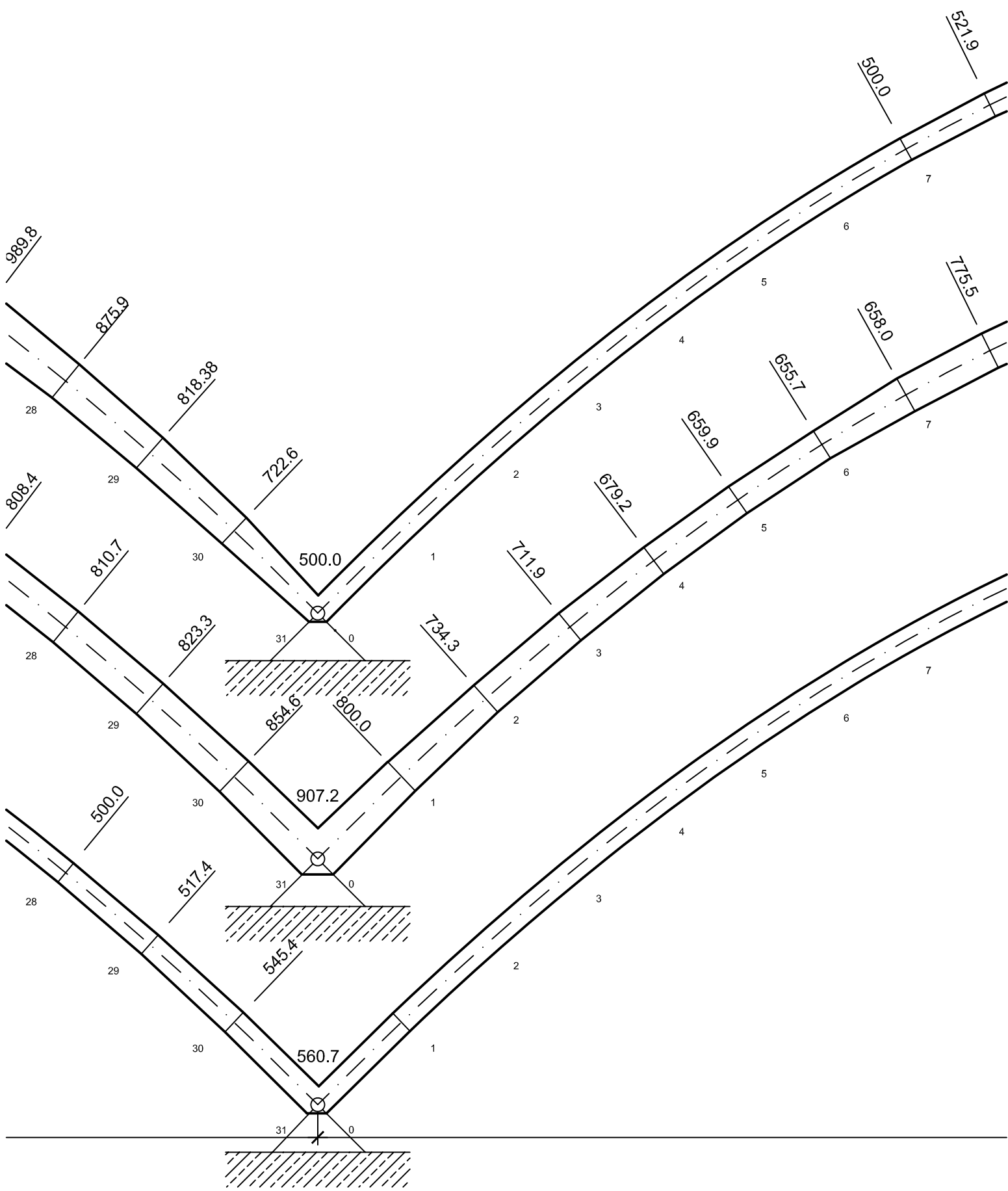


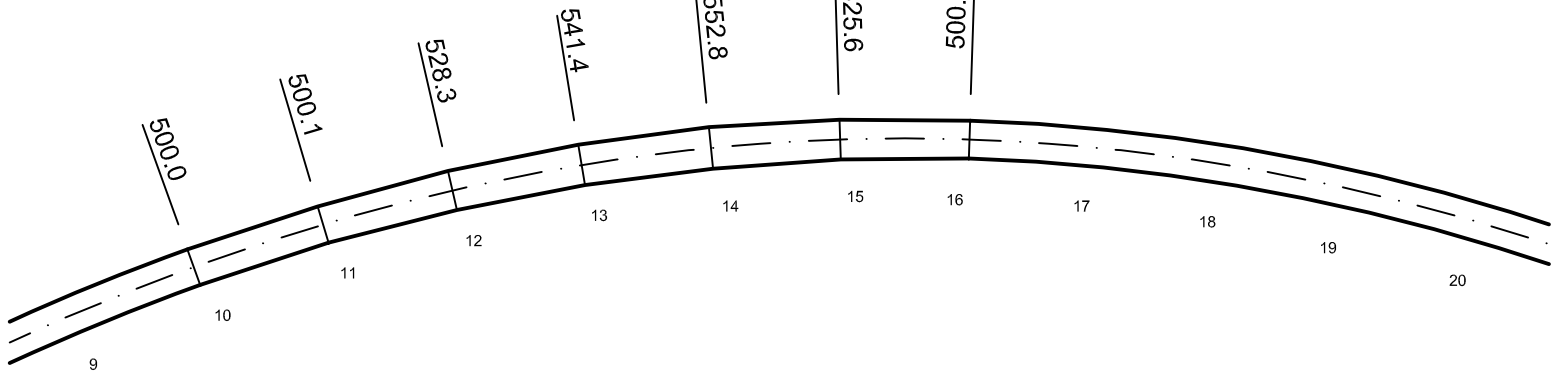
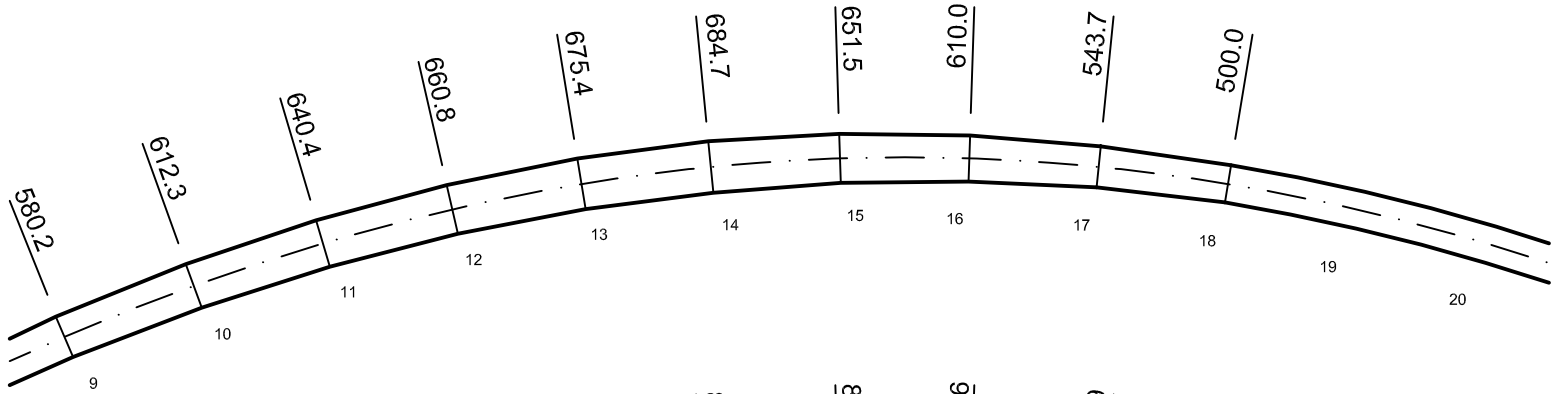




53000

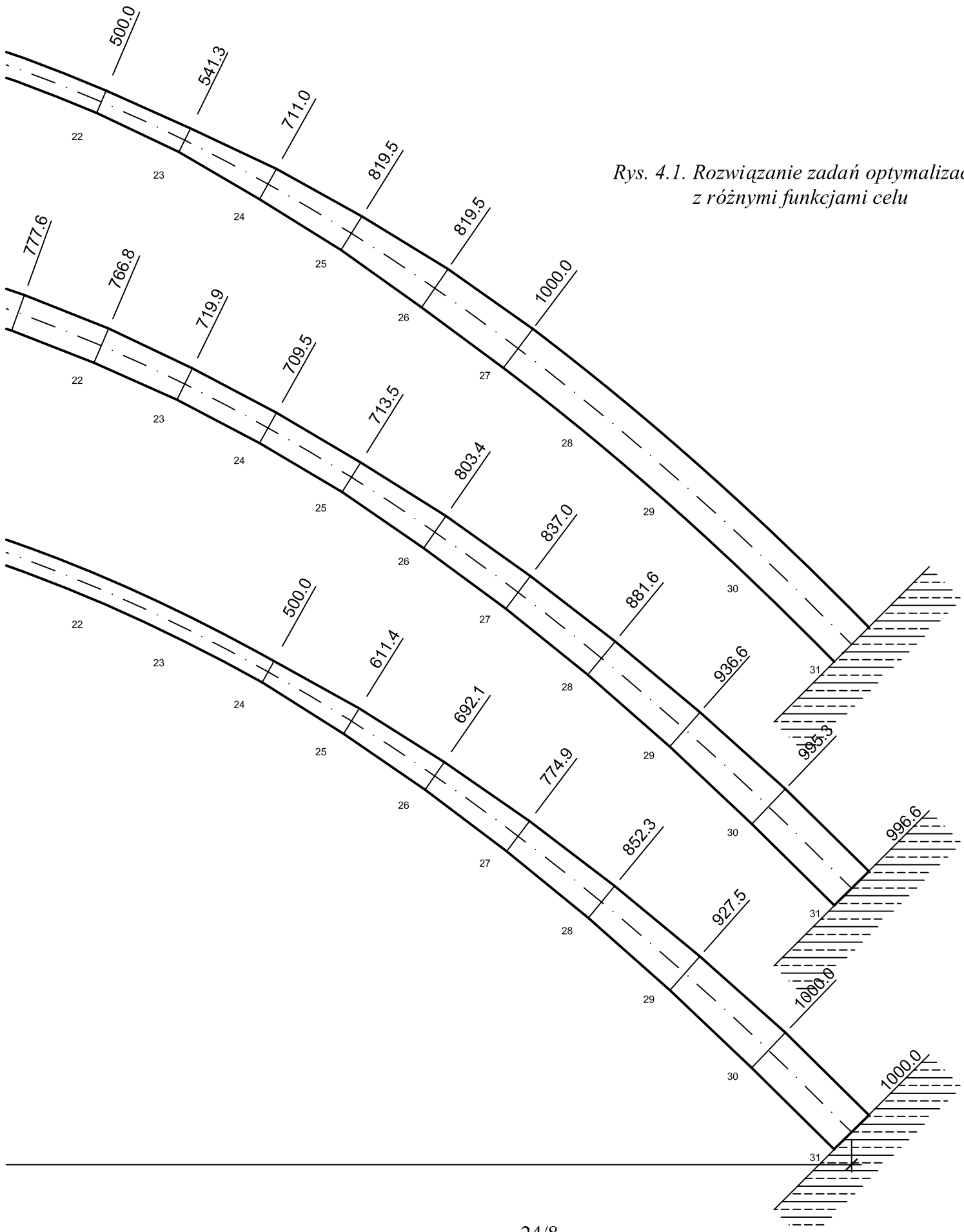






53000





Rys. 4.1. Rozwiązanie zadań optymalizacji z różnymi funkcjami celu



## Rozdział 5

# Optymalizacja przekroju poprzecznego wiaduktu drogowego, poddanego działaniu różnych stanów obciążenia

W pracy inżynierskiej podejmowanie decyzji jest obciążone konsekwencjami i to w szczególnych jej aspektach tj. bezpieczeństwa wznoszenia, bezpieczeństwa użytkowania oraz opłacalności danego przedsięwzięcia.

W projektowaniu obiektu budowlanego niezbędne jest założenie parametrów konstrukcyjnych, ustalonych ze względu na warunki budowy. Parametry konstrukcyjne to własności fizykochemiczne materiałów takich jak stal czy beton, parametry geometryczne obiektu, parametry związane z zastosowaną technologią montażu itp. W trakcie wznoszenia obiektu parametry te nie mogą ulegać zmianom. W szczególności nie może ulec zmianie technologia montażu przyjęta przez projektanta na etapie obliczeń jeżeli ma ona istotne znaczenie w wymiarowaniu elementów konstrukcyjnych.

Firmy, które zawodowo zajmują się realizacją ambitnych projektów inżynierskich posiadają technologie, które nie są na ogół rozpowszechnione w środowiskach zespołów projektowych z racji tajemnicy handlowej. Jednak technologie powinny być uwzględnione w procesie projektowania, ponieważ bardzo często stany montażowe decydują o istotnych parametrach konstrukcyjnych wznoszonego obiektu budowlanego.

### 5.1 Założenia projektowe

Przy opracowaniu niniejszego tematu kierowano się następującymi założeniami:

- Obiekt usytuowany jest w obszarze zabudowanym w ciągu drogi zbiorczej o kategorii obciążenia ruchem KR5.

- Nośność obiektu odpowiada klasie obciążenia A.
- Obiekt przekracza autostradę, drogę zbiorczą oraz jednotorową linię kolejową.
- Ruch drogowy autostrady i drogi zbiorczej oraz ruch kolejowy może być wstrzymany sporadycznie wyłącznie w trakcie pojedynczych operacji technologicznych zagrożających bezpieczeństwu ruchu.

Na podstawie powyższych założeń przyjęto geometrię obiektu oraz podstawowe cechy konstrukcyjne.

## 5.2 Dane techniczne projektowanego wiaduktu

### 5.2.1 Ogólna charakterystyka wiaduktu

Projektowany obiekt to wiadukt drogowy żelbetowy. Płyta jezdna, o przekroju poprzecznym belkowym, pracuje w schemacie ośmioprzęsłowej belki ciągłej. Rozpiętości teoretyczne poszczególnych przęseł wynoszą kolejno: 12,0 m, 15,5 m, 4x15,0 m, 15,5 m, 12,0 m. Długość całkowita obiektu wraz z przyczółkami wynosi 129 m.

Płyta jezdna jest oparta na trzech kołowych łukach żelbetowych za pomocą tarcz podporowych. Rozpiętości teoretyczne przęseł łuków wynoszą kolejno 25,9 m, 60,0 m, 25,9 m. Strzałka łuków wynosi 12,0 m.

Pod łukiem środkowym mieszczą się dwie skrajnie autostradowe o wymiarach 15,5 m x 4,7 m każda. Pod łukami skrajnymi mieści się skrajnia drogi zbiorczej o wymiarach 9 x 4,7 m i skrajnia kolejowa linii normalnotorowej. Pomost stanowi układ belkowo-płytowy, żelbetowy, o wymiarach belek 1,5 m x 1,5 m i grubości płyty pomostowej 0,35 m.

W przekroju poprzecznym pomostu występuje:

- jezdnia o szerokości 7,0 m,
- bariery sprężyste SP-06 wraz z pasami ochronnymi 2 x 0,75 m,
- chodniki 2 x 1,2 m,
- pasy poręczy 2 x 0,26 m.

Całkowita szerokość pomostu wynosi 11,42 m. Spadki poprzeczne jezdni 2%. Płyta pomostu przekazuje obciążenie na łuki poprzez tarcze, sztywno zamocowane w łukach.

Podpory pomostu stanowią dwa przyczółki żelbetowe oraz filary tarczowe o szerokości 7,5 m, grubości 1,0 m i zmiennej wysokości (max 12,0 m). Podpory łuków żelbetowych posadowione są na fundamentach, wzmocnionych układami pali wielkośrednicowych, o następujących wymiarach:

- fundament podpór pośrednich o szerokości 8,0 m długości 8,0 m i wysokości 3,5 m,
- fundament podpór skrajnych (przyczółków) o szerokości 5,2 m, długości 8,0 m, i wysokości 4.5 m.

Fundamenty zostaną wykonane w ściankach szczelnych dodatkowo zabezpieczających grunt przed rozmyciem.

Wyposażenie obiektu stanowić będą:

- łożyska garnkowe o nośności 6,0 i 18,0 MN,
- dylatacje bitumiczne szczelne o dopuszczalnym przesuwie do 50 mm,
- poręcze stalowe P1, bariery sprężyste SP-06/M,
- elementy instalacji odwadniającej z kolektorem PCV  $\phi$  400 odprowadzającym wodę opadową do układu odwodnienia dróg dojazdowych.

Nawierzchnię jezdni stanowić będzie podwójna warstwa betonu asfaltowego 5+6 cm na izolacji z papy zgrzewnej. Nawierzchnia chodników będzie wykonana z materiałów epoksydowych.

## 5.2.2 Zestawienie podstawowych parametrów obiektu mostowego

Przekrój poprzeczny pomostu (Rys.5.1):

- Jezdnia: 7,00 m
- Chodniki: 2 x 1,20 m
- Opaski wraz z barierami ochronnymi: 2 x 0,75 m
- Gzymsy wraz z poręczami 2 x 0,26 m

Całkowita szerokość pomostu 11,42 m.

Ogólna charakterystyka obiektu (Rys.5.2)

Rozpiętość teoretyczna przęseł pomostu :	$12,0 + 15,0 + 4 \times 15,0 + 15,5 + 12 = 115$ m
Rozpiętość teoretyczna przęseł łuków:	$25,9 + 60,0 + 25,9 = 111,8$ m
Długość całkowita obiektu:	129,0 m
Kąt skosu obiektu:	90°
Spadek podłużny	zmienny wg łuku pionowego $r = 6000$ m
Klasa obciążenia:	klasa A wg PN-85/S-10030
Strzałka łuków skrajnych:	12,0 m
Strzałka łuku centralnego:	12,0 m
Promień łuków skrajnych:	16,125 m
Promień łuku centralnego:	43,500 m

## 5.3 Rozwiązania architektoniczno-budowlane

### 5.3.1 Uzasadnienie przyjętego rozwiązania

W koncepcji programowo przestrzennej przedstawiono dwa warianty konstrukcji wiaduktu. W jednym zaproponowano wiadukt sprężony w układzie belkowym ciągłym z podporą w pasie rozdziału. W drugim przedstawiono wariant wiaduktu w kształcie łuku trójprzęsłowego. Wybrano wariant drugi.

Wybór drugiego wariantu wynikał z analizy techniczno-ekonomicznej która potwierdziła, że jego realizacja nie wymaga zamknięcia każdego z pasów autostrady oraz linii kolejowej. Realizacja pierwszego wariantu wiązała się z potrzebą wykonania pali w pasie rozdziału oraz podpór, a następnie rusztowań do betonowania przęseł. Pierwszy wariant okazał się zbyt kosztowny. Dodatkowo za wyborem drugiego wariantu przemawiały względy architektoniczne. Most łukowy lepiej komponuje się w krajobraz górski niż most belkowy.

### 5.3.2 Opis technologii montażu obiektu przyjętego do realizacji

Po wykonaniu fundamentów, za pomocą żurawi samochodowych, montuje się połówki łuków prefabrykowanych złożone z elementów wykonanych w zakładzie prefabrykacji (Rys.5.3). Następnie montuje się jarzma zabezpieczające łuki prefabrykowane przed utratą stateczności w trakcie betonowania.

Po zakończeniu montażu łuków prefabrykowanych montuje się na nich deskowanie przesuwne, następnie układa się zbrojenie i wypełnia się mieszanką betonową przestrzenie pomiędzy prefabrykatami oraz, jeśli jest taka potrzeba, wykonuje się warstwę nadbetonu (Rys.5.4, Rys.5.5). Betonowanie łuków wykonuje się symetrycznie w kilku etapach, rozpoczynając od odcinków przy fundamentach. Kolejny etap betonowania może nastąpić wtedy, gdy beton wykonany w poprzednim etapie osiągnie odpowiednie własności wytrzymałościowe.

Po zakończeniu wszystkich etapów betonowania łuków żelbetowych i po osiągnięciu przez beton wymaganych własności wytrzymałościowych wykonuje się podpory stałe pomostu oraz montuje się podpory montażowe (Rys.5.6).

Na podporach stałych i montażowych montuje się deskowanie pomostu, a następnie układa się zbrojenie i mieszankę betonową.

Po osiągnięciu przez beton pomostu wymaganych własności wytrzymałościowych usuwa się deskowanie i montuje się warstwy nawierzchni oraz wyposażenie.

### 5.3.3 Materiały konstrukcyjne

Pale :	beton B30, stal zbrojeniowa A-III 34GS
Fundamenty :	beton B35, stal zbrojeniowa A-III 34GS
Łuki prefabrykowane :	beton B40, stal zbrojeniowa A-III 34GS
Łuki żelbetowe :	beton B40, stal zbrojeniowa A-III 34GS
Tarcze podporowe:	beton B40, stal zbrojeniowa A-III 34GS
Pomost:	beton B30, stal zbrojeniowa A-III 34GS
Elementy atalowe :	stal konstrukcyjna St3S

## 5.4 Obliczenia statyczne oddziaływań pomostu na łuki żelbetowe

### 5.4.1 Zakres obliczeń

Obliczenia statyczne całego wiaduktu zostały wykonane w czterech zasadniczych etapach:

Etap I: Analiza statyczno-wytrzymałościowa płyty pomostowej dźwigara wiaduktu.

- Obliczenie sił wewnętrznych w przekrojach belkowych płyty pomostu w kierunku podłużnym od obciążeń w fazie budowy i w fazie eksploatacji.
- Obliczanie ilości potrzebnego zbrojenia w kierunku podłużnym.
- Obliczanie sił wewnętrznych w przekrojach belkowych płyty pomostu w kierunku poprzecznym od obciążeń w fazie budowy i w fazie eksploatacji.
- Obliczenie ilości potrzebnego zbrojenia w kierunku poprzecznym.
- Sprawdzenie stanów granicznych nośności i użytkowania.
- Obliczenie reakcji podpór pomostu (stałych i montażowych) w okresie montażu oraz stałych w okresie eksploatacji.

Etap II: Wymiarowanie tarcz podporowych pomostu.

Etap III: Wymiarowanie łuków prefabrykowanych.

Etap IV: Optymalizacja łuków żelbetowych.

W pracy przedstawiono szczegółowo etap IV obliczeń. W odniesieniu do etapów I,II,III ograniczono się tylko do przedstawienia założeń do obliczeń statycznych wykonanych w ramach powyższych etapów. Wszystkie obliczenia wykonano w zakresie sprężystym z wykorzystaniem metody naprężeń liniowych w konwencji rozdzielonych współczynników bezpieczeństwa.

## 5.4.2 Parametry materiałowe

Parametry materiałowe przyjęto na podstawie normy PN-91/S-10042.

	Beton klasy B 30	Beton klasy B 40
Współczynnik sprężystości podłużnej	$E_b = 32,6 \text{ GPa}$	$E_b = 36,4 \text{ GPa}$
Współczynnik Poissona	$\nu_b = 0,167$	$\nu_b = 0,167$
Wytrzymałość obliczeniowa przy ściskaniu	$R_{b1} = 17,3 \text{ MPa}$ $R_{b2} = 19,2 \text{ MPa}$	$R_{b1} = 23,1 \text{ MPa}$ $R_{b2} = 25,6 \text{ MPa}$
Wytrzymałość obliczeniowa przy rozciąganiu	$R_{bt0,05} = 1,15 \text{ MPa}$	$R_{bt0,05} = 1,4 \text{ MPa}$

Stal zbrojeniowa klasy A-III, gatunek 34GS

Współczynnik sprężystości podłużnej	$E_a = 210 \text{ GPa}$
Wytrzymałość charakterystyczna	$R_{ak} = 410 \text{ MPa}$
Wytrzymałość obliczeniowa	$R_a = 340 \text{ MPa}$

## 5.4.3 Oddziaływanie tarcz podporowych i podpór montażowych na łuki żelbetowe w fazie montażu płyty pomostu

W stanie montażu płyty pomostu uwzględniono następujące obciążenia:

- obciążenie ciężarem własnym płyty z uwzględnieniem wody zarobowej i zbrojenia,
- obciążenie deskowaniem i technologiczne,
- obciążenie ciężarem własnym tarcz podporowych,
- obciążenie podporami montażowymi.

W obliczeniach statycznych, których w pracy nie przedstawiono, wyznaczono wartości sił skupionych przekazywanych na łuki żelbetowe przez tarcze podporowe i podpory montażowe płyty pomostu (Rys.5.7).

## 5.4.4 Oddziaływanie tarcz podporowych na łuki żelbetowe w fazie eksploatacji

### Obciążenia stałe

W stanie eksploatacji, w obliczeniach oddziaływań tarcz podporowych na łuki żelbetowe, uwzględniono następujące obciążenia stałe:

- obciążenie ciężarem własnym płyty,
- obciążenie ciężarem własnym nawierzchni jezdni, nawierzchni chodników oraz wyposażenia,

- obciążenie ciężarem własnym tarcz podporowych,

W obliczeniach statycznych, których w pracy nie przedstawiono, wyznaczono wartości sił skupionych od obciążeń stałych, przekazywanych na łuki żelbetowe przez tarcze podporowe płyty pomostu (Rys.5.8).

### Obciążenia zmienne

W stanie eksploatacji, w obliczeniach oddziaływań tarcz podporowych na łuki żelbetowe, wywołanych obciążeniami zmiennymi, uwzględniono obciążenia normowe wg PN-85/S-10-30, zgodnie z przyjętą klasą obciążenia:

- obciążenie równomiernie rozłożone samochodami  $q$ , działające na całej szerokości jezdni,  $q = 4 \frac{KN}{m^2}$ ,  $\gamma_q = 1,25$ ;  
współczynnik dynamiczny  $\phi = 1,35 - 0,005 \cdot 15,00 = 1,275$ ,  $q_q = 4,0 \cdot 7,0 \cdot 1,25 \cdot 1,275 = 44,625 \frac{KN}{m}$ ;
- obciążenie równomiernie rozłożone tłumem pieszych  $p$ , działające jednocześnie na obu chodnikach, na szerokości przeznaczonej dla ruchu pieszych,  $p = 2,5 \frac{KN}{m^2}$ ,  $\gamma_p = 1,25$ ;  
 $q_p = 2 \cdot 2,5 \cdot 1,2 \cdot 1,25 = 7,5 \frac{KN}{m}$ ;
- obciążenie  $K$  w postaci czterech sił skupionych o wartości  $0,25K$ , przyłożonych symetrycznie nad jedną z podpór pomostu,  $K = 800$  KN,  $\gamma_K = 1,25$ ,  $\phi = 1,275$ ;  
 $P_K = 0,25 \cdot 800 \cdot 1,25 \cdot 1,275 = 318,75$  KN.

Rozważono 5 wariantów najbardziej niekorzystnego rozłożenia obciążenia zmiennego:

wariant 1.

obciążenie samochodami  $q$  i tłumem pieszych  $p$  w przęsłach 1,2,4,6,8 oraz obciążenie  $K$  nad drugą podporą pomostu (Rys.5.9),

wariant 2.

obciążenie samochodami  $q$  i tłumem pieszych  $p$  w przęsłach 1,3,4,6,8 oraz obciążenie  $K$  nad czwartą podporą pomostu,

wariant 3.

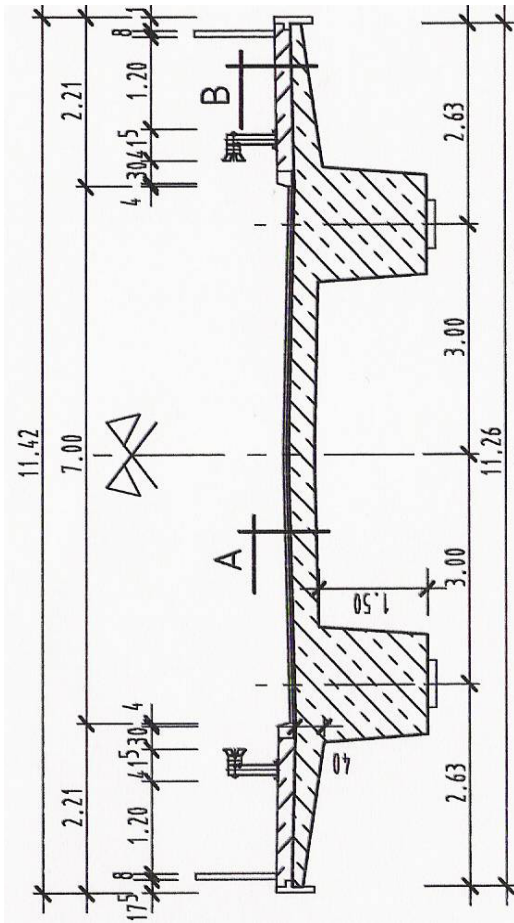
obciążenie samochodami  $q$  i tłumem pieszych  $p$  w przęsłach 2,4,5,7 oraz obciążenie  $K$  nad piątą podporą pomostu,

wariant 4.

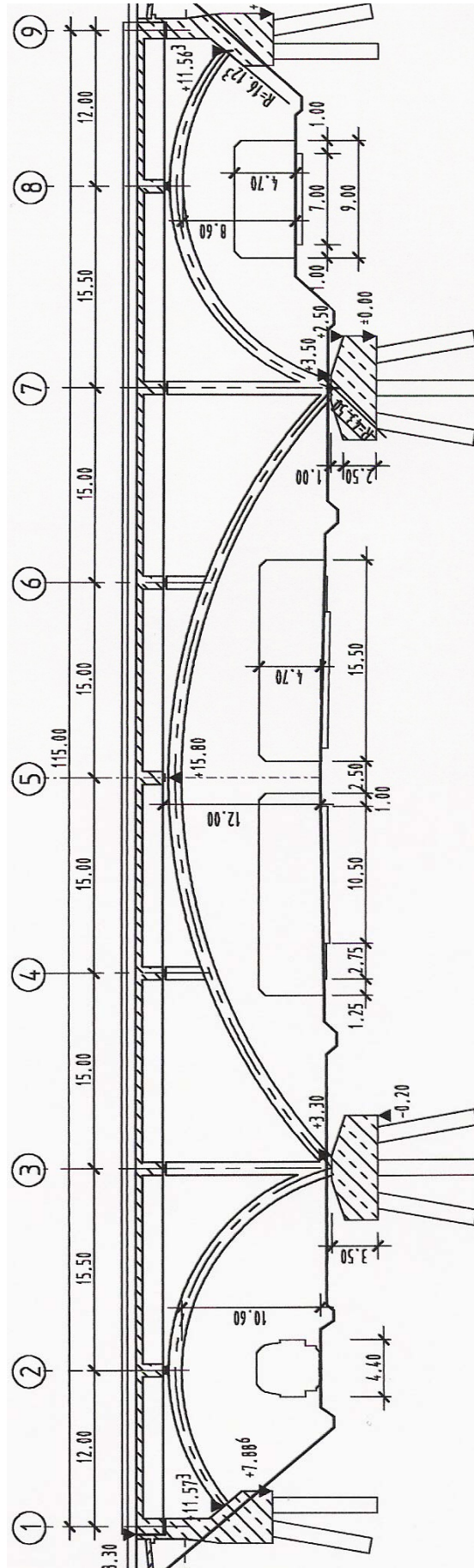
obciążenie samochodami  $q$  i tłumem pieszych  $p$  w przęsłach 1,3,5,6,8 oraz obciążenie  $K$  nad szóstą podporą pomostu,

wariant 5.

obciążenie samochodami  $q$  i tłumem pieszych  $p$  w przęsłach 1,3,5,7,8 oraz obciążenie  $K$  nad ósmą podporą pomostu.

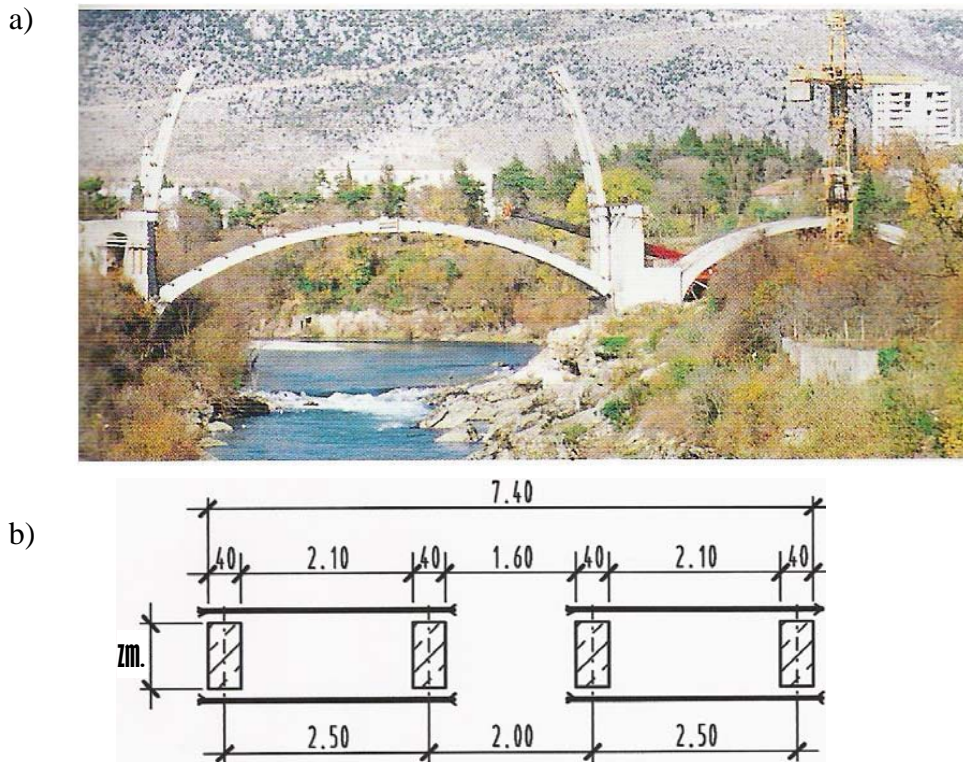


Rys. 5.1. Przekrój poprzeczny płyty pomostu

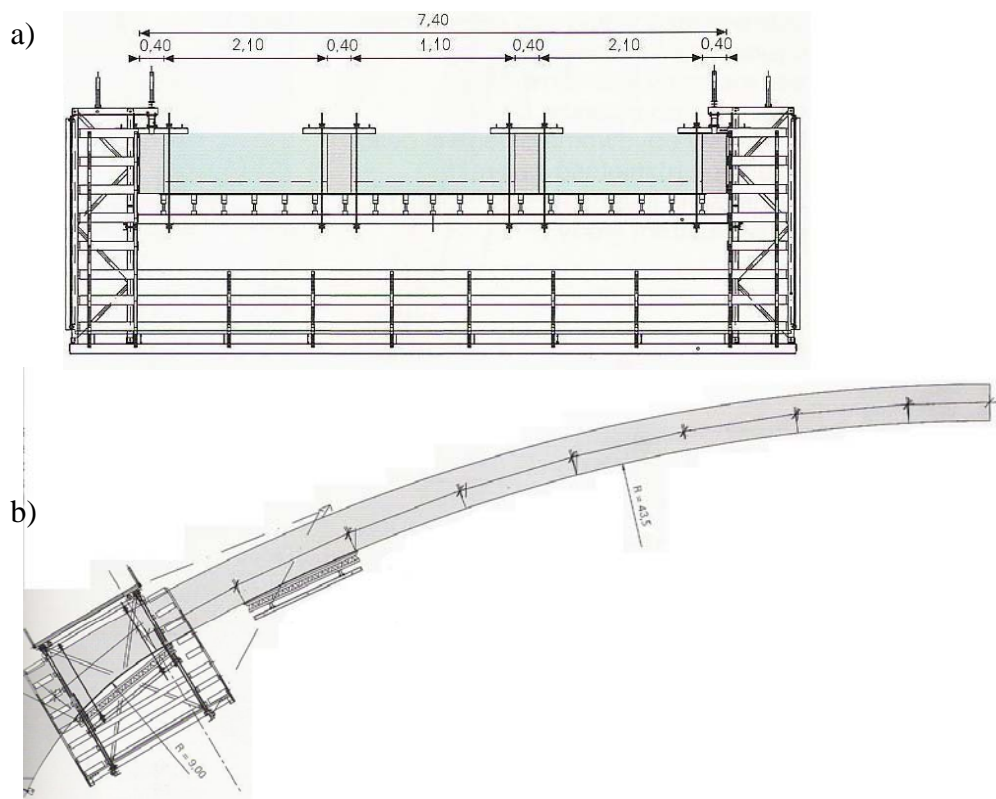


Rys. 5.2. Przekrój podłużny obiektu





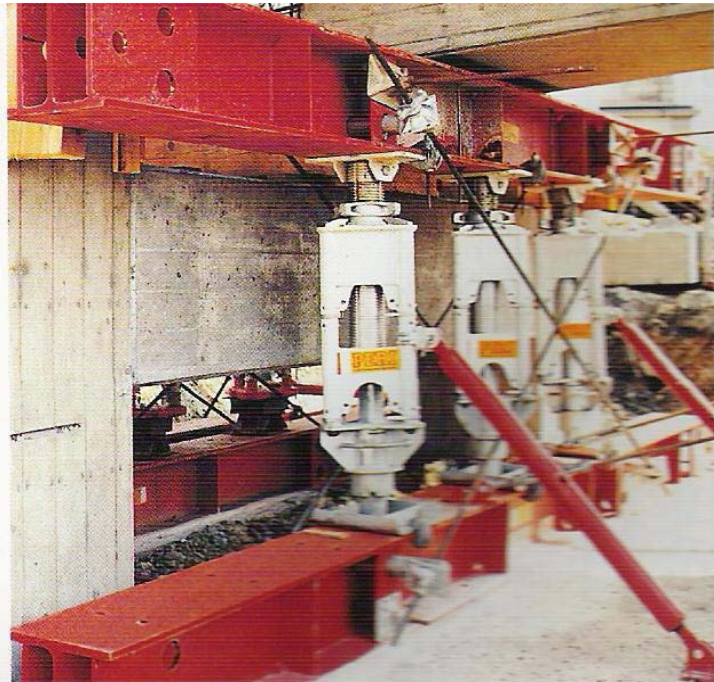
Rys. 5.3. Montaż połówek łuków prefabrykowanych;  
 a) przykładowa realizacja (Most Carinski, Mostar, Bośnia i Hercegowina),  
 b) przekrój poprzeczny łuków prefabrykowanych



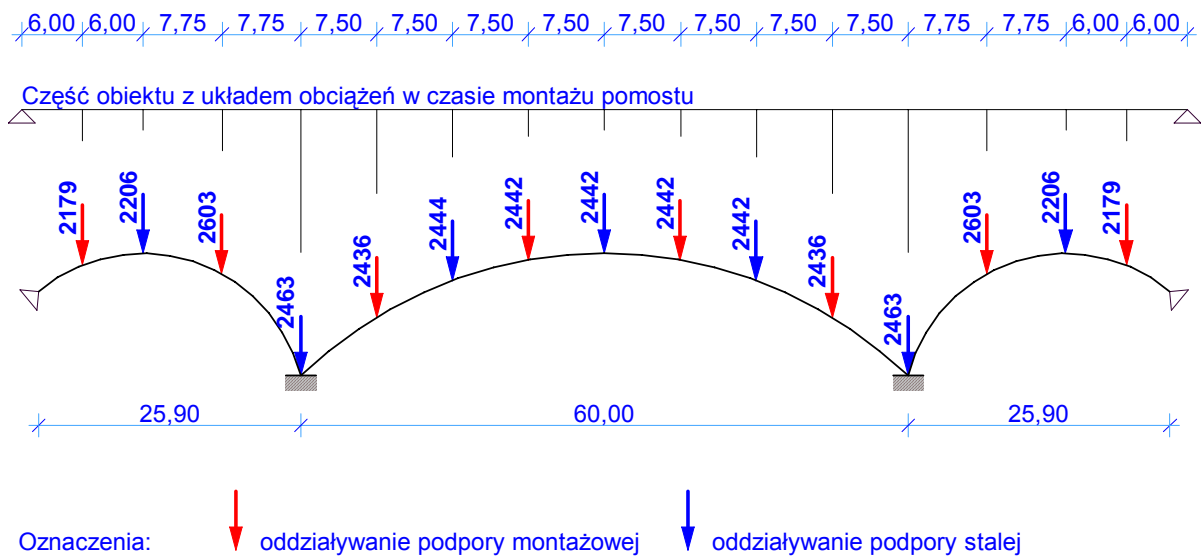
Rys. 5.4. Betonowanie łuków żelbetowych na deskowaniu przesuwalnym;  
 a) przekrój poprzeczny,  
 b) widok z boku



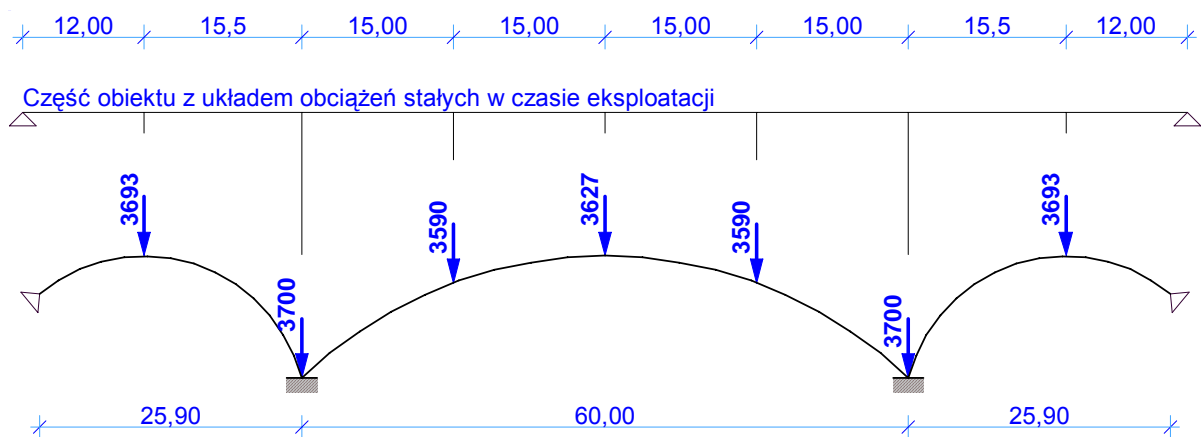
*Rys. 5.5. Przykład realizacji przesuwnych rusztowań (Most Carinski, Mostar, Bośnia i Hercegowina)*



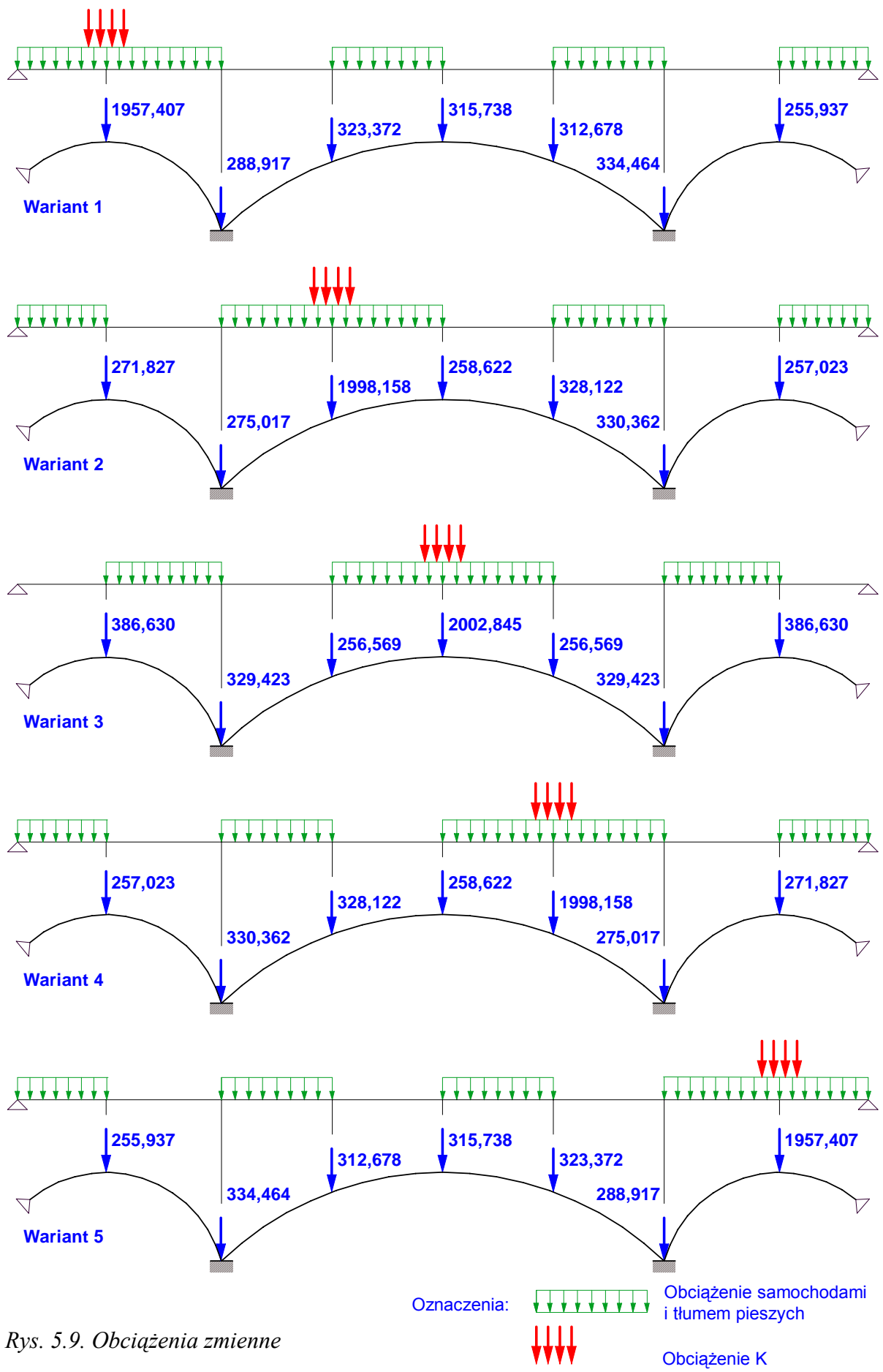
*Rys. 5.6. Przykład realizacji podpory montażowej pomostu.*



Rys. 5.7. Schemat oddziaływań tarcz podporowych i podpór montażowych na łuki żelbetowe w fazie montażu płyty pomostu (siły w [kN] – wartości charakterystyczne, odległości w [m])



Rys. 5.8. Schemat oddziaływań tarcz podporowych na łuki żelbetowe w fazie eksploatacji od obciążeń stałych (siły w [kN] – wartości charakterystyczne, odległości w [m])



Rys. 5.9. Obciążenia zmienne

## 5.5 Model matematyczny łuków żelbetowych

### 5.5.1 Równanie osi łuków

Ze względu na symetrię obiektu oraz układ obciążeń przyjęty w dalszej części pracy, w obliczeniach można rozważyć schemat połówkowy (Rys.5.10). W miejscu połączenia obu łuków, ze względu na sposób posadowienia, w rozważanych schematach statycznych przyjmuje się pełne utwierdzenie, natomiast na końcu obiektu łożysko stałe. W osi symetrii, w przypadku obciążeń symetrycznych, przyjmuje się utwierdzenie z możliwością pionowego przesuwu, natomiast w przypadku obciążeń niesymetrycznych formuluje się odpowiednie warunki punktowe typu *implicit*[17].

Współrzędne środków łuków wyznaczono na podstawie rysunku (Rys.5.10), przy czym, w odniesieniu do łuku skrajnego obowiązują zależności:

$$\cos \alpha = \frac{4,125}{16,125}, \quad \sin \alpha = \frac{d}{16,125} \Rightarrow d = 15,588\text{m}. \quad (5.1)$$

Łuk centralny:  $R_1 = 43,500 \text{ m}$ ,  $x_1 = 0,000 \text{ m}$   $y_1 = -31,500 \text{ m}$

Łuk skrajny:  $R_2 = 16,125 \text{ m}$ ,  $x_2 = 45,588 \text{ m}$   $y_2 = -4,125 \text{ m}$

Równanie osi łuków:

Łuk centralny:  $y = \sqrt{R_1^2 - (x - x_1)^2} + y_1$

Łuk skrajny:  $y = \sqrt{R_2^2 - (x - x_2)^2} + y_2$

### 5.5.2 Wyznaczenie odcinków betonowania

Założono, że betonowanie łuków będzie przebiegało w dziewięciu etapach, symetrycznie, począwszy od odcinków przypodporowych. W związku z tym łuki podzielono na odcinki betonowania (Rys.5.11).

Łuk centralny: odcinek pierwszy o długości 1,904 m, pozostałe 3,900 m.

Łuk skrajny: odcinek ostatni o długości 4,744 m, pozostałe 4,600 m.

Uwzględniając zależności geometryczne wyznaczono współrzędne punktów podziału na odcinki betonowania (wartości w m).

Na łuku centralnym  $x_0 = 0,000$  Na łuku skrajnym:  $x_{10} = 31,791$

$x_1 = 1,903$   $x_{11} = 34,698$

$x_2 = 5,787$   $x_{12} = 38,485$

$x_3 = 9,624$   $x_{13} = 42,845$

$x_4 = 13,383$   $x_{14} = 47,428$

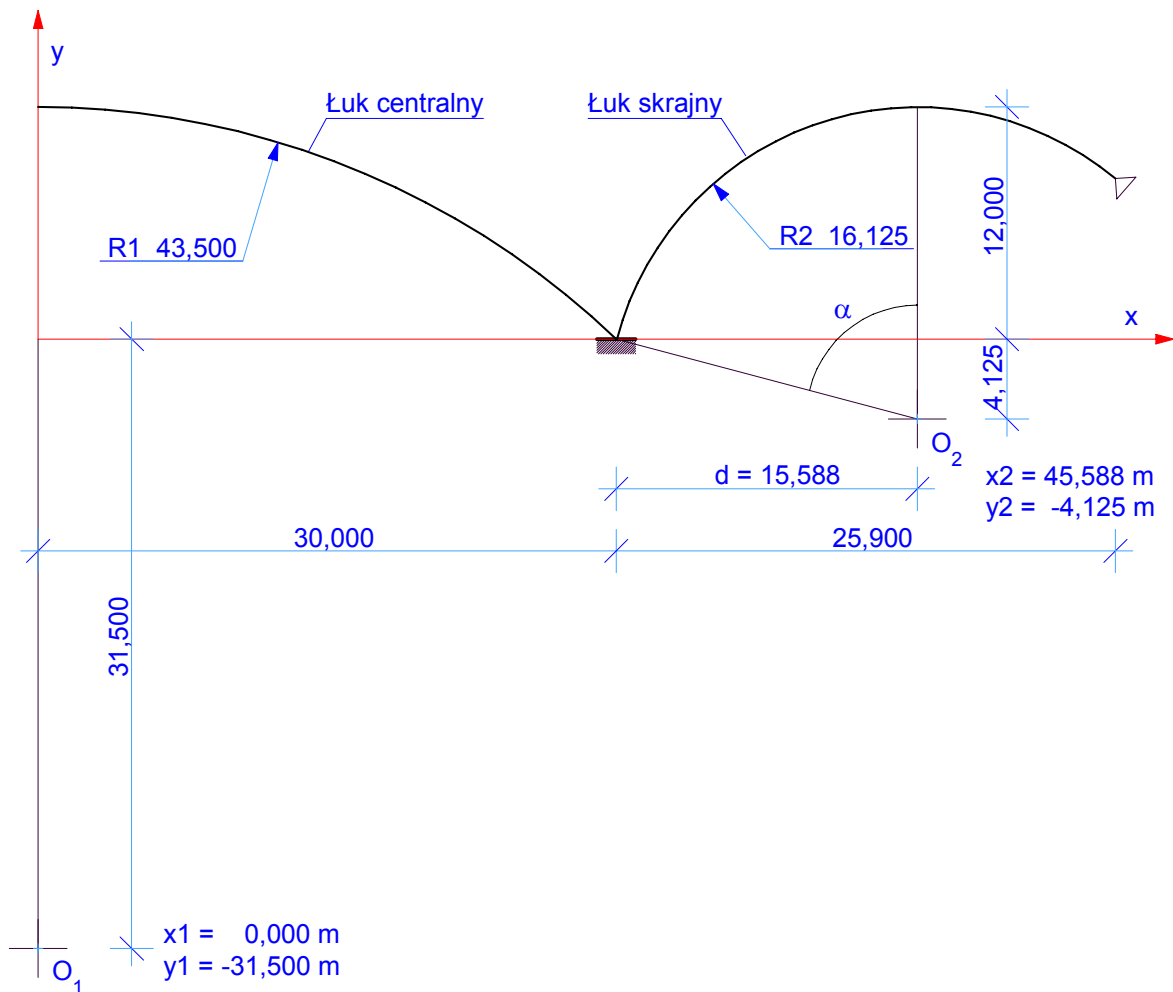
$x_5 = 17,035$   $x_{15} = 51,862$

$x_6 = 20,551$   $x_{16} = 55,900$

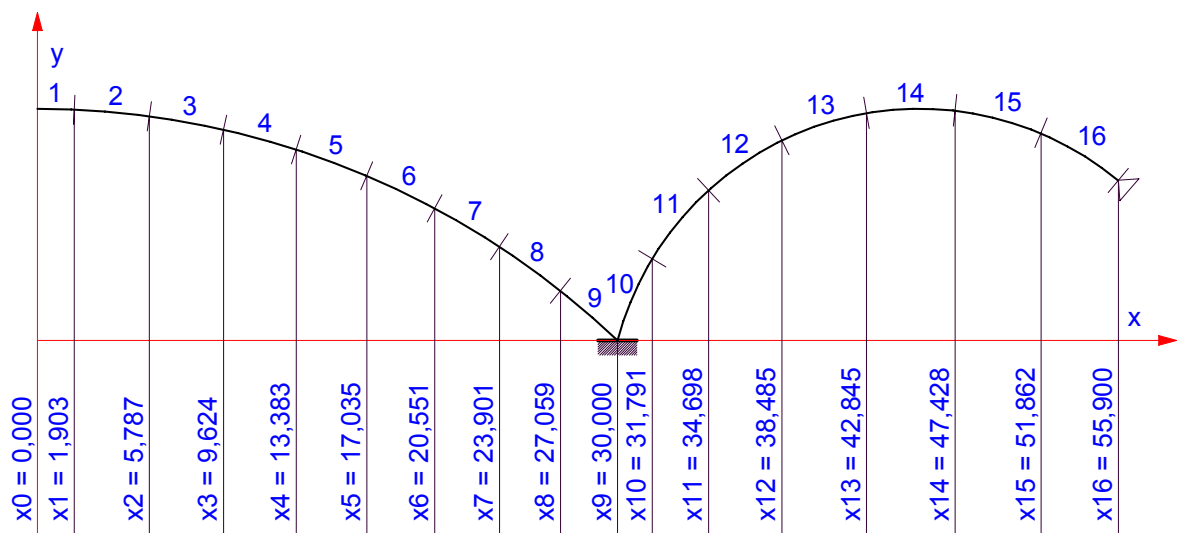
$x_7 = 23,901$

$x_8 = 27,059$

$x_9 = 30,000$



Rys. 5.10. Geometria osi łuków (wymiary w [m])



Rys. 5.11. Podział na odcinki betonowania (wymiary w [m])

### 5.5.3 Fazy pracy łuków żelbetowych

Ustalając fazy pracy kierowano się następującymi założeniami:

1. W trakcie trwania danej fazy pracy nie ulega zmianie schemat statyczny.
2. W trakcie trwania danej fazy pracy nie ulega zmianie układ obciążeń.
3. W danej fazie pracy uwzględnia się obciążenia o tym samym charakterze (tylko krótkotrwałe lub tylko długotrwałe).
4. Fazy pracy ustalono w taki sposób, aby w każdej sytuacji obliczeniowej wartości naprężeń i ugięć były sumą efektów oddziaływań uwzględnionych w odpowiednich dla tej sytuacji obliczeniowej fazach pracy.
5. W konsekwencji zasady czwartej każde obciążenie może być rozważane tylko w jednej fazie pracy.

W rozważanych stanach montażowych, w odniesieniu do niektórych obciążeń krótkotrwałych, odstąpiono od stosowania zasady 3. W tych fazach występują obciążenia krótkotrwałe, które wywołują długotrwały efekt. Są to obciążenia technologiczne, obciążenie ciężarem deskowania, i obciążenie ciężarem wody zarobowej, która ulega odparowaniu. Temu układowi obciążeń, występującym w danej fazie montażowej, zawsze towarzyszy układ przeciwny w kolejnej fazie. Efekty działania obu tych układów nie znoszą się, ponieważ działają przy różnych własnościach fizycznych betonu i różnych charakterystykach geometrycznych przekroju poprzecznego.

#### Fazy montażowe

Podczas wszystkich faz montażowych ulegają zmianie własności betonu, a tym samym charakterystyki geometryczne przekroju. Przekrój łuków jest analizowany jako zespolony betonowo-betonowy. Własności betonu zostały uzależnione od czasu, jaki upłynął od początku danej fazy betonowania. Za fazę betonowania uważa się:

- układanie mieszanki betonowej,
- czas twardnienia i dojrzewania betonu, po którym są możliwe prace związane z przygotowaniem betonowania następnego segmentu,
- demontaż deskowania i innych urządzeń na zamontowanym odcinku,
- montaż deskowania następnego segmentu.

Ustalono 10 faz montażowych obejmujących 9 etapów betonowania łuków żelbetowych oraz etap montażu pomostu. W każdym etapie montażowym, w poszczególnych odcinkach betonowania, uwzględniono rodzaj przekroju (prefabrykowany lub zespolony betonowo-betonowy) odpowiadający temu etapowi. Obliczając sprowadzone charakterystyki geometryczne przekrojów uwzględniono pełzanie betonu stosując metodę zastępczego modułu sprężystości. Przekrój łuków w poszczególnych fazach montażowych przedstawiono w sposób poglądowy na rysunkach (Rys.5.12 i Rys.5.13). Układy obciążeń w 10 stanach montażowych przedstawiono schematycznie na rysunkach (Rys.5.14 ÷ Rys.5.23).

Wartości obciążeń w fazach montażowych (wartości charakterystyczne):

- obciążenie technologiczne ciągłe	$q_t = 4,0 \text{ KN/m}$	$\gamma_t = 1,5$	
- obciążenie wiatrem	$q_w = 6,0 \text{ KN/m}$	$\gamma_w = 1,3$	
- obciążenie technologiczne skupione	$P_t = 100,0 \text{ KN}$	$\gamma_t = 1,5$	
- ciężar rusztowania przesuwne	$P_r = 250 \text{ KN}$	$\gamma_r = 1,2$	
- ciężar własny odparowanej wody	$q_h$ funkcja x		
- ciężar własny mieszanki betonowej	$q_m$ funkcja x		
- ciężar własny łuków prefabrykowanych	$q_l = 21,6 \text{ KN/m}$	$\gamma_l = 1,2$	
$P_{05} = 2442 \text{ KN}$	$P_{04} = 2444 \text{ KN}$	$P_{03} = 2463 \text{ KN}$	$P_{02} = 2206 \text{ KN}$
$P_{054} = 2442 \text{ KN}$	$P_{043} = 2436 \text{ KN}$	$P_{032} = 2603 \text{ KN}$	$P_{021} = 2179 \text{ KN}$

## Fazy eksploatacji

Ze względu na charakter oraz układ obciążeń ustalono 6 faz eksploatacji:

Faza 1, w której łuki żelbetowe są poddane oddziaływaniom podpór pomostu, spowodowanych ciężarem własnym części obiektu opartej na łukach (Rys.5.14). Ustalając schemat statyczny łuków żelbetowych odpowiadający tej fazie pracy założono, że dokładność wykonania obiektu upoważnia do przyjęcia obciążeń symetrycznych. Obciążenia w tej fazie pracy przyjęto na podstawie obliczeń statycznych, których wyniki przedstawiono na rysunku (Rys.5.8).

Wartości sił w fazie 1 (wartości charakterystyczne):

$$P_{e5} = 3627 \text{ kN}, \quad P_{e4} = 3590 \text{ kN}, \quad P_{e3} = 3700 \text{ kN}, \quad P_{e2} = 3693 \text{ kN}$$

Współczynnik obciążenia w fazie 1:  $\gamma_e = 1,25$

Fazy 2 ÷ 6, w których łuki żelbetowe są poddane oddziaływaniom podpór pomostu, spowodowanym normowym obciążeniem samochodami  $q$ , tłumem pieszych  $p$  oraz pojazdem K (rys. 5.25). Wartości tych oddziaływań wyznaczono w obliczeniach statycznych, których wyniki przedstawiono na rysunkach 5.9. W fazach 2 ÷ 6 uwzględniono 5 najbardziej niekorzystnych wariantów ustawienia ww. obciążeń. W wariacie 3 obciążenia są symetryczne i dlatego w odniesieniu do tego wariantu przyjęto schemat połówkowy obiektu symetrycznego. Pozostałe warianty nie są symetryczne. Zachodzi jednak symetria pomiędzy wariantem 1 i 5 oraz 2 i 4. W takich przypadkach zachodzi symetria bądź antysymetria odpowiednich zmien-



nych stanu odpowiadających symetrycznym względem siebie sytuacjom obliczeniowym. Dlatego w sytuacjach obliczeniowych odpowiadających wariantom 1,2,4 i 5, w osi symetrii obiektu nie przyjęto żadnej podpory. Sformułowano natomiast w tym punkcie odpowiednie warunki zmiennych stanu na podstawie następujących związków zachodzących pomiędzy zmiennymi stanu odpowiadającymi symetrycznym względem siebie sytuacjom obliczeniowym:

- równe przemieszczenia normalne do osi,
- przeciwne kąty obrotu,
- równe momenty zginające,
- przeciwne siły poprzeczne,
- przeciwne przemieszczenia styczne do osi,
- równe siły podłużne.

Takie sformułowanie umożliwia przyjęcie w obliczeniach schematu połówkowego i pozwala sformułować odpowiednią liczbę warunków zmiennych stanu w osi symetrii obiektu.

Wartości sił w fazach 2 ÷ 6 (wartości obliczeniowe w [kN]):

Faza 2 (K1):	$K_{15} = 315,738$	$K_{14} = 312,678$	$K_{13} = 334,464$	$K_{12} = 255,937$
Faza 3 (K2):	$K_{25} = 258,622$	$K_{24} = 328,122$	$K_{23} = 330,362$	$K_{22} = 257,023$
Faza 4 (K3):	$K_{35} = 2002,845$	$K_{34} = 256,569$	$K_{33} = 329,423$	$K_{32} = 386,630$
Faza 5 (K4):	$K_{45} = 258,622$	$K_{44} = 1998,158$	$K_{43} = 275,017$	$K_{42} = 271,827$
Faza 6 (K5):	$K_{55} = 315,738$	$K_{54} = 323,372$	$K_{53} = 288,917$	$K_{52} = 1957,407$

## 5.6 Obciążenia działające na łuk

Wprowadzono następujące oznaczenia:

$E_{ci}$  - moduł Young'a betonu, którego czas dojrzewania odpowiada czasowi, jaki upłynął od chwili rozpoczęcia i-tego cyklu betonowania

$A_{ci}$  - powierzchnia przekroju zespolonego, którego czas dojrzewania odpowiada czasowi, jaki upłynął od chwili rozpoczęcia i-tego cyklu betonowania

$I_{ci}$  - moment bezwładności przekroju zespolonego, którego czas dojrzewania odpowiada czasowi, jaki upłynął od chwili rozpoczęcia i-tego cyklu betonowania

$A_i$  - powierzchnia przekroju zespolonego, jako funkcja czasu i zmiennej  $x$  odmierzanej wzdłuż rzutu pionowego.

$I_i$  - moment bezwładności przekroju zespolonego, jako funkcja czasu i zmiennej niezależnej  $x$  odmierzanej wzdłuż rzutu pionowego.

Wielkości  $A_i, I_i$  są obliczane w każdym punkcie  $x$  wzdłuż rzutu pionowego w każdej fazie

montażu z zastosowaniem funkcji indykatorowej (skokowej)  $w$ .  
Funkcja  $w$  definiowana jest następująco [15],[16],[17]:

$$w(x, a, b) = \begin{cases} 0 & \text{gdy } x \notin [a, b], \\ 1 & \text{gdy } x \in [a, b]. \end{cases} \quad (5.2)$$

Wprowadzenie funkcji  $w$  umożliwia podział ustroju na przedziały charakterystyczne, których granicami są wyłącznie początek i koniec ustroju oraz podpora pośrednia.

### **Opis obciążeń**

$q_p$  - ciężar własny łuków prefabrykowanych odniesiony do osi łuku

$q_m$  - ciężar własny mieszanki betonowej odniesiony do osi łuku (zależny od zmiennej decyzyjnej), przyłożony do betonowanego segmentu łuku.

$q_h$  - ciężar własny odparowanej wody z mieszanki odniesiony do osi łuku, przyłożony do segmentu zabetonowanego w poprzedniej fazie jako obciążenie odciążające

$q_t$  - obciążenie technologiczne ciągle podczas betonowania odniesione do rzutu na oś  $OX$ , działające nad segmentem zabetonowanym w poprzedniej fazie

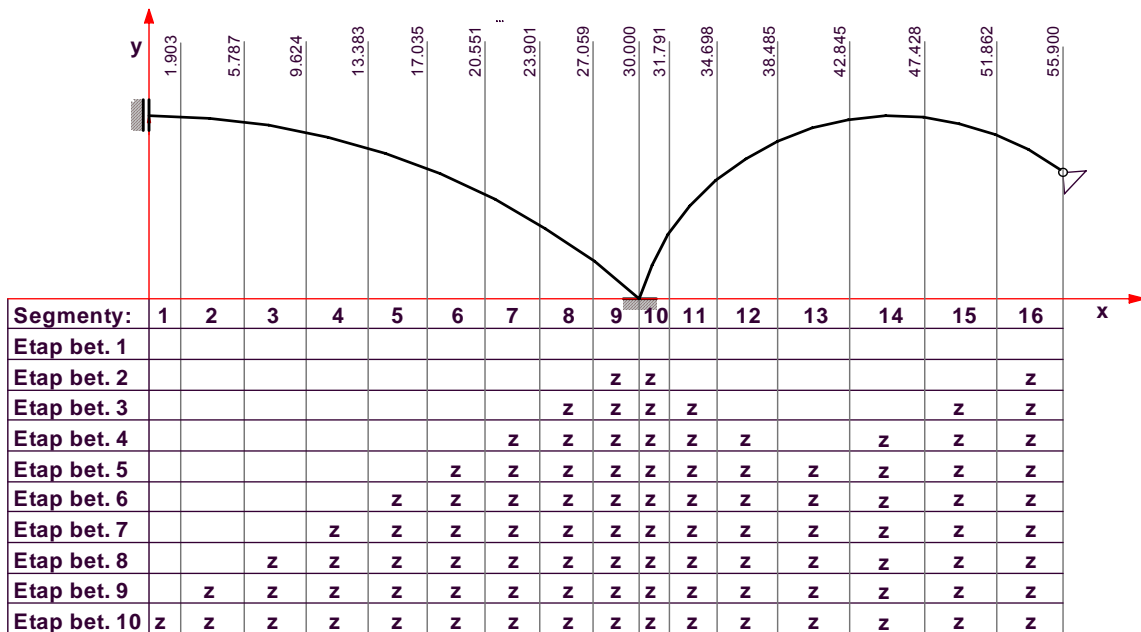
$q_t$  - j.w. lecz jako odciążające przyłożone do odcinka betonowanego przed poprzednią fazą

$P_t$  - obciążenie technologiczne skupione podczas betonowania, przyłożone na końcu segmentu zabetonowanego w poprzedniej fazie

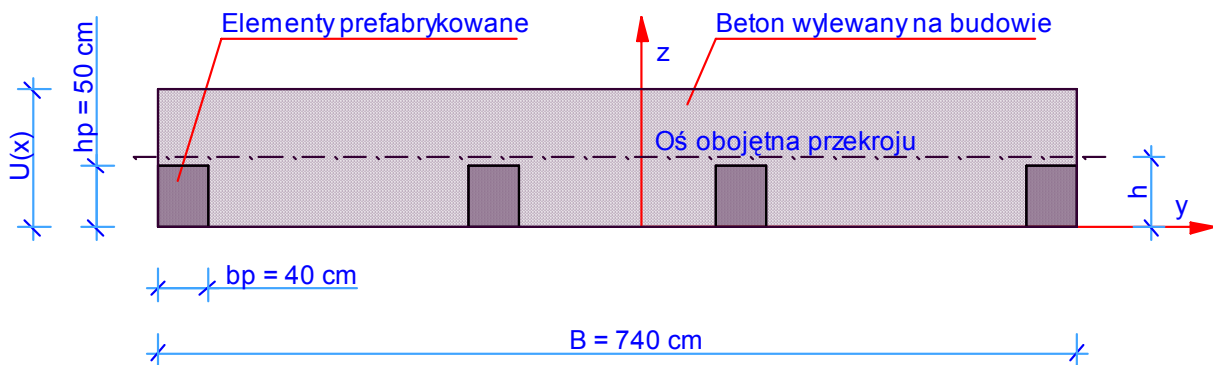
$P_t$  - j.w. lecz jako odciążające przyłożone na początku segmentu zabetonowanego w poprzedniej fazie

$P_r$  - ciężar rusztowania (obciążenie skupione) działający na końcu betonowanego segmentu

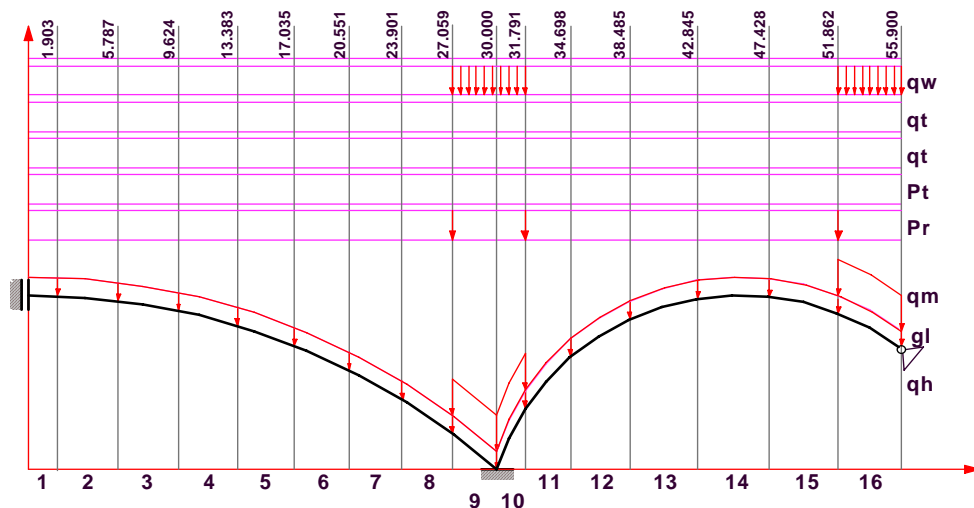
$P_r$  - j.w. lecz jako odciążający na początku betonowanego segmentu



Rys. 5.12. Schemat przyjęty w obliczeniach oraz przekrój łuku w poszczególnych fazach montażowych;  
 z – przekrój zespolony betonowo-betonowy,  
 brak oznaczenia – przekrój prefabrykowany.



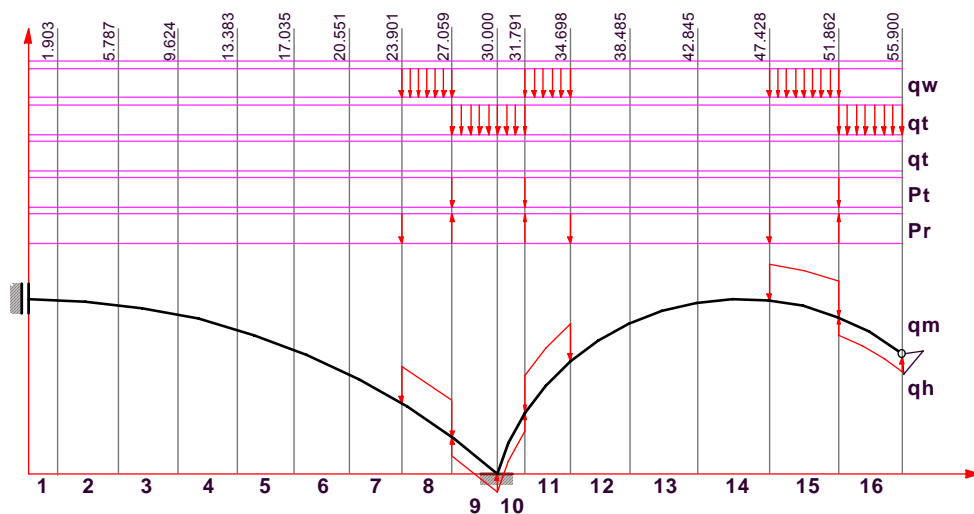
Rys. 5.13. Przekrój łuku żelbetowego;  
 $U(x)$  – wysokość przekroju (zmienna decyzyjna),  
 $h$  – położenie osi obojętnej przekroju w układzie  $yz$ .



Rys. 5.14. Faza montażowa: betonowanie segmentów 9, 10, 16.

Obciążenia:

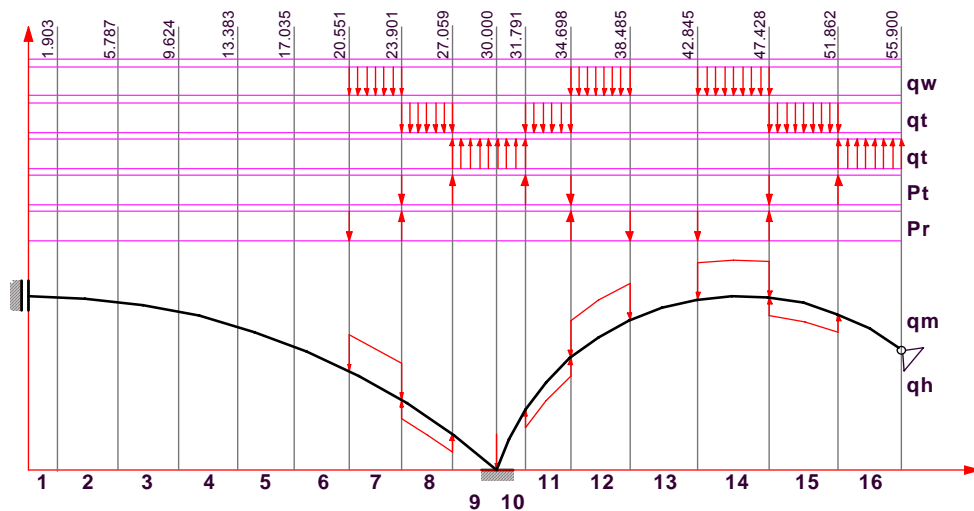
- obciążenie ciężarem własnym łuków prefabrykowanych,
- obciążenie mieszanką w segmentach 9, 10, 16,
- obciążenie wiatrem w segmentach 9, 10, 16,
- ciężar rusztowania w punktach  $x_8$ ,  $x_{10}$ ,  $x_{15}$ .



Rys. 5.15. Faza montażowa 2 – betonowanie segmentów 8, 11, 15.

Obciążenia:

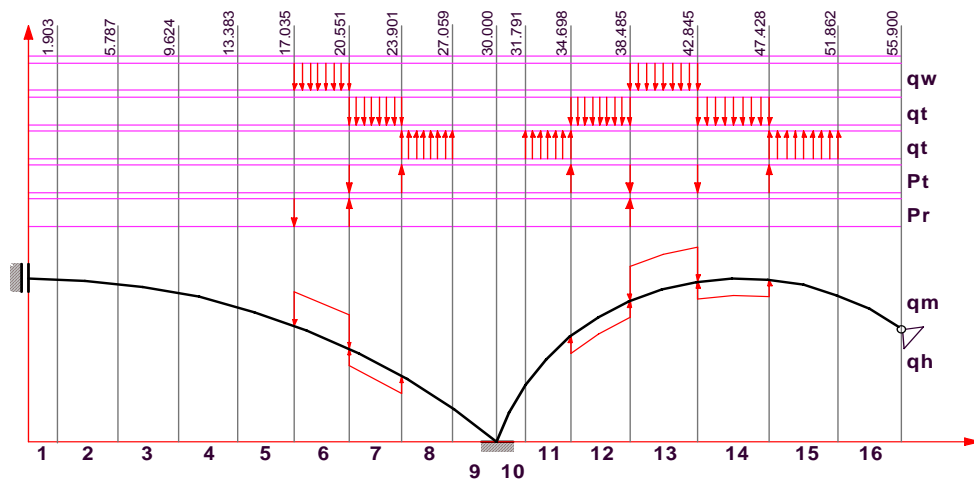
- obciążenie mieszanką w segmentach 8, 11, 15,
- obciążenie wiatrem w segmentach 8, 11, 15,
- ujemny ciężar odparowanej wody w segmentach 9, 10, 16,
- obciążenie technologiczne ciągłe w segmentach 9, 10, 16,
- obciążenie technologiczne skupione w punktach  $x_8$ ,  $x_{10}$ ,  $x_{15}$
- ciężar rusztowania w punktach  $x_7$ ,  $x_{11}$ ,  $x_{14}$ ,
- ujemny ciężar rusztowania w punktach  $x_8$ ,  $x_{10}$ ,  $x_{15}$ .



Rys. 5.16. Faza montażowa 3 – betonowanie segmentów 7, 12, 14.

Obciążenia:

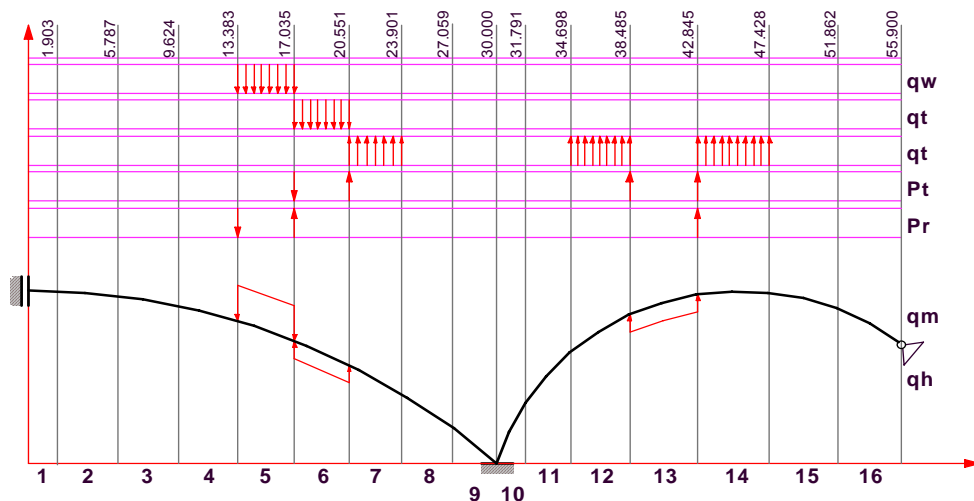
- obciążenie mieszanką w segmentach 7, 12, 14,
- obciążenie wiatrem w segmentach 7, 12, 14,
- ujemny ciężar odparowanej wody w segmentach 8, 11, 15,
- obciążenie technologiczne ciągle w segmentach 8, 11, 15,
- ujemne obciążenie technologiczne ciągle w segmentach 9, 10, 16,
- obciążenie technologiczne skupione w punktach  $x_7$ ,  $x_{11}$ ,  $x_{14}$ ,
- ujemne obciążenie technologiczne skupione w punktach  $x_8$ ,  $x_{10}$ ,  $x_{15}$ ,
- ciężar rusztowania w punktach  $x_6$ ,  $x_{12}$ ,  $x_{13}$ ,
- ujemny ciężar rusztowania w punktach  $x_7$ ,  $x_{11}$ ,  $x_{14}$ .



Rys. 5.17. Faza montażowa 4 – betonowanie segmentów 6, 13.

Obciążenia:

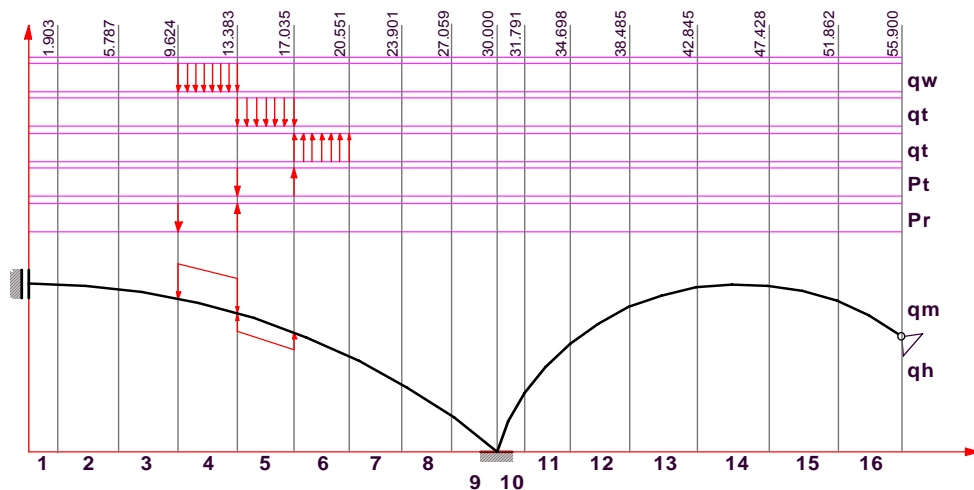
- obciążenie mieszanką w segmentach 6, 13,
- obciążenie wiatrem w segmentach 6, 13,
- ujemny ciężar odparowanej wody w segmentach 7, 12, 14,
- obciążenie technologiczne ciągle w segmentach 7, 12, 14,
- ujemne obciążenie technologiczne ciągle w segmentach 8, 11, 15,
- obciążenie technologiczne skupione w punktach  $x_6$ ,  $x_{12}$ ,  $x_{13}$ ,
- ujemne obciążenie technologiczne skupione w punktach  $x_7$ ,  $x_{11}$ ,  $x_{14}$ ,
- ciężar rusztowania w punktach  $x_5$ ,  $x_{13}$ ,
- ujemny ciężar rusztowania w punktach  $x_6$ ,  $x_{12}$ .



Rys. 5.18. Faza montażowa 5 – betonowanie segmentu 5.

Obciążenia:

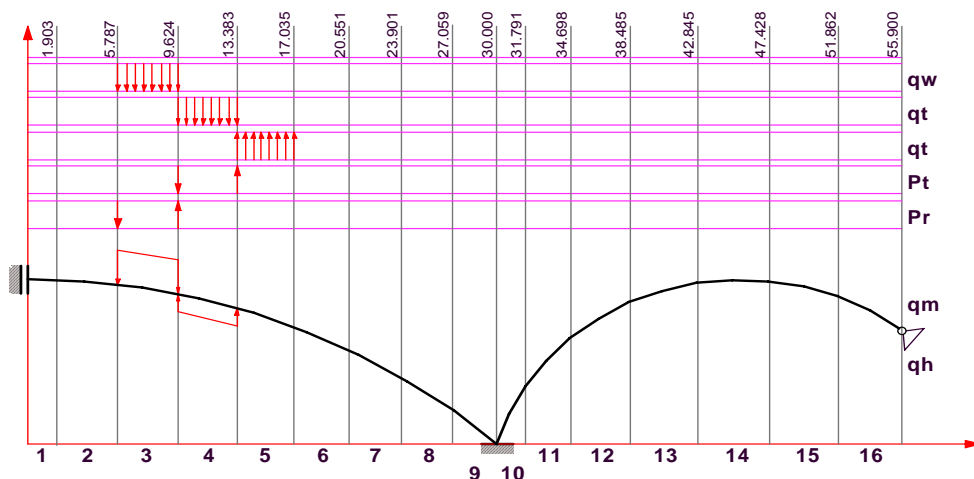
- obciążenie mieszanką w segmencie 5,
- obciążenie wiatrem w segmencie 5,
- ujemny ciężar odparowanej wody w segmentach 6, 13,
- obciążenie technologiczne ciągle w segmencie 6,
- ujemne obciążenie technologiczne ciągle w segmentach 7, 12, 14,
- obciążenie technologiczne skupione w punkcie  $x_5$ ,
- ujemne obciążenie technologiczne skupione w punktach  $x_6$ ,  $x_{12}$ ,  $x_{13}$ ,
- ciężar rusztowania w punkcie  $x_4$ ,
- ujemny ciężar rusztowania w punktach  $x_5$ ,  $x_{13}$ .



Rys. 5.19. Faza montażowa 6 – betonowanie segmentu 4.

Obciążenia:

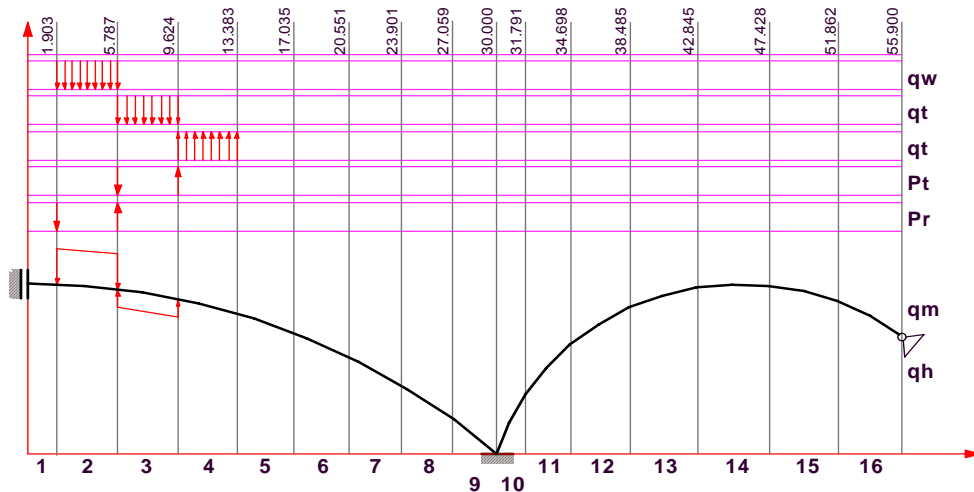
- obciążenie mieszanką w segmencie 4,
- obciążenie wiatrem w segmencie 4,
- ujemny ciężar odparowanej wody w segmencie 5,
- obciążenie technologiczne ciągle w segmencie 5,
- ujemne obciążenie technologiczne ciągle w segmencie 6,
- obciążenie technologiczne skupione w punkcie  $x_4$ ,
- ujemne obciążenie technologiczne skupione w punkcie  $x_5$ ,
- ciężar rusztowania w punkcie  $x_3$ ,
- ujemny ciężar rusztowania w punkcie  $x_4$ .



Rys. 5.20. Faza montażowa 7 – betonowanie segmentu 3.

Obciążenia:

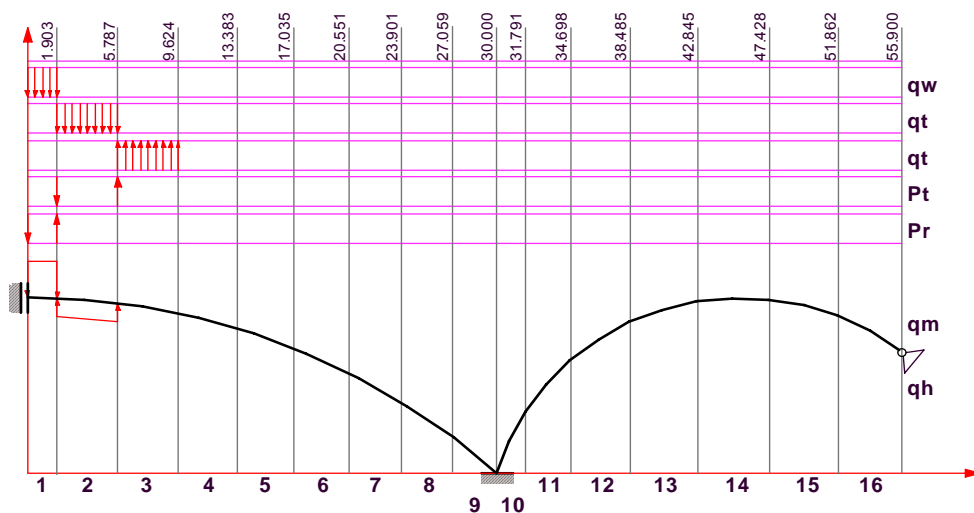
- obciążenie mieszanką w segmencie 3,
- obciążenie wiatrem w segmencie 3,
- ujemny ciężar odparowanej wody w segmencie 4,
- obciążenie technologiczne ciągłe w segmencie 4,
- ujemne obciążenie technologiczne ciągłe w segmencie 5,
- obciążenie technologiczne skupione w punkcie  $x_3$ ,
- ujemne obciążenie technologiczne skupione w punkcie  $x_4$ ,
- ciężar rusztowania w punkcie  $x_2$ ,
- ujemny ciężar rusztowania w punkcie  $x_3$ .



Rys. 5.21. Faza montażowa 8 – betonowanie segmentu 2.

Obciążenia:

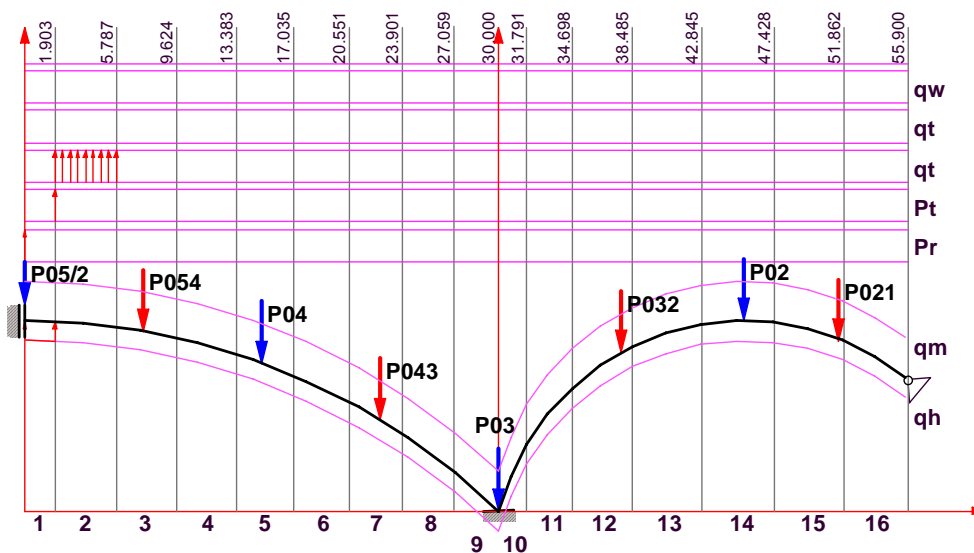
- obciążenie mieszanką w segmencie 2,
- obciążenie wiatrem w segmencie 2,
- ujemny ciężar odparowanej wody w segmencie 3,
- obciążenie technologiczne ciągłe w segmencie 3,
- ujemne obciążenie technologiczne ciągłe w segmencie 4,
- obciążenie technologiczne skupione w punkcie  $x_2$ ,
- ujemne obciążenie technologiczne skupione w punkcie  $x_3$ ,
- ciężar rusztowania w punkcie  $x_1$ ,
- ujemny ciężar rusztowania w punkcie  $x_2$ .



Rys. 5.22. Faza montażowa 9 – betonowanie segmentu 1.

Obciążenia:

- obciążenie mieszanką w segmencie 1,
- obciążenie wiatrem w segmencie 1,
- ujemny ciężar odparowanej wody w segmencie 2,
- obciążenie technologiczne ciągle w segmencie 2,
- ujemne obciążenie technologiczne ciągle w segmencie 3,
- obciążenie technologiczne skupione w punkcie  $x_1$ ,
- ujemne obciążenie technologiczne skupione w punkcie  $x_2$ ,
- ciężar rusztowania w punkcie  $x_0$ ,
- ujemny ciężar rusztowania w punkcie  $x_1$ .

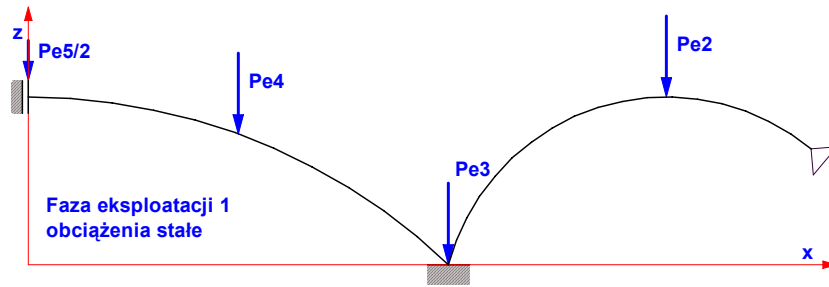


Rys. 5.23. Faza montażowa 10 – demontaż urządzeń w segmencie 1 i montaż pomostu.

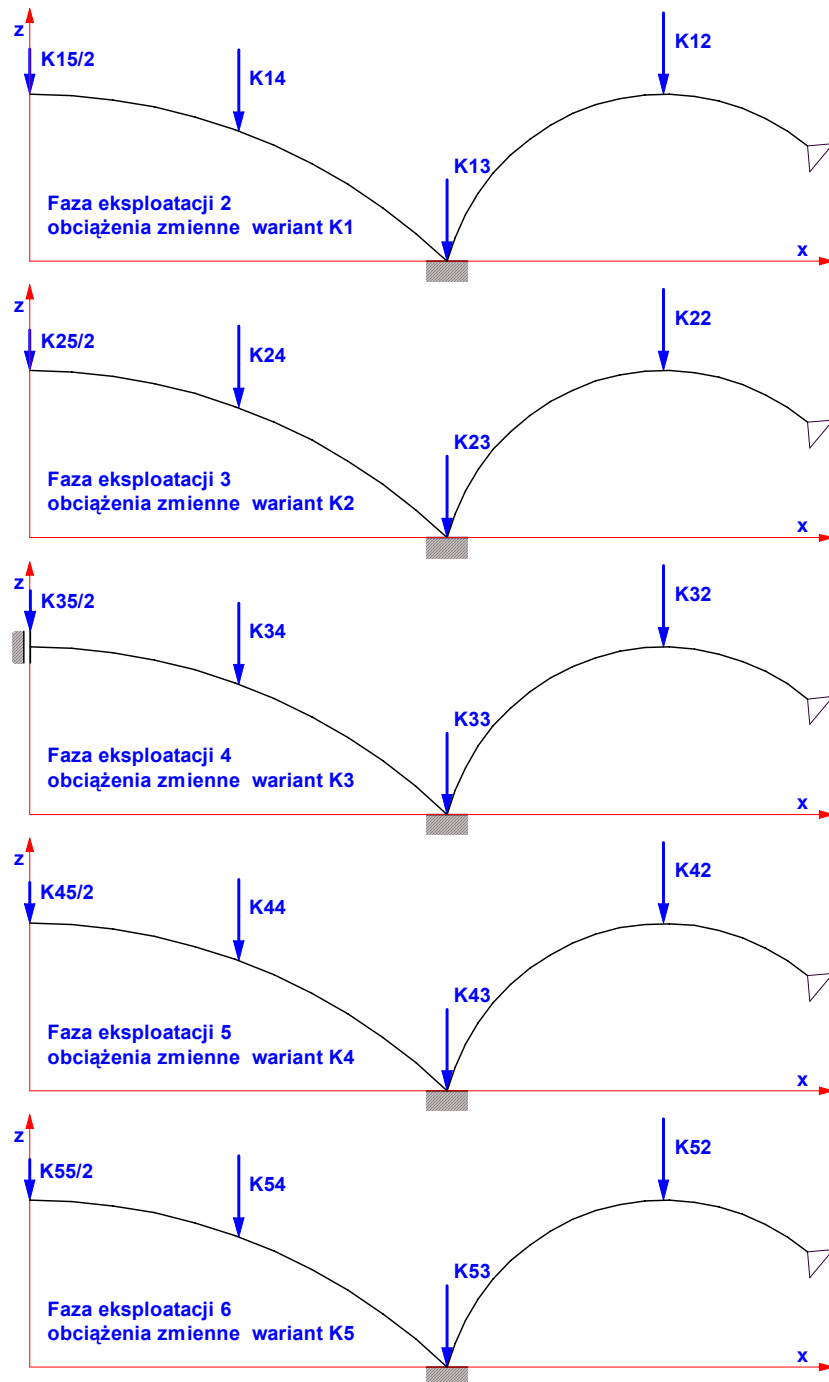
Obciążenia:

- ujemny ciężar odparowanej wody w segmencie 1,
- ujemne obciążenie technologiczne ciągle w segmencie 2,
- ujemne obciążenie technologiczne skupione w punkcie  $x_1$ ,
- ujemny ciężar rusztowania w punkcie  $x_0$ ,
- obciążenie przekazywane na łuk przez podpory stałe płyty pomostu,
- obciążenie przekazywane na łuk przez podpory montażowe.





Rys. 5.24. Faza eksploatacji 1 – obciążenia stałe



Rys. 5.25. Fazy eksploatacji 2 ÷ 6 – obciążenie zmienne (warianty K1 ÷ K5)

### 5.6.1 Moduł Young'a betonu w fazie montażu

$$\begin{aligned}
 E_{cp} &= \frac{E_c}{(1 + \phi(t_{10}, t_0))} && \text{– moduł Young'a betonu prefabrykatów,} \\
 E_{c1} &= \frac{E_c}{(1 + \phi(t_9, t_0))} && \text{– moduł Young'a betonu ułożonego w pierwszej fazie betonowania,} \\
 E_{c2} &= \frac{E_c}{(1 + \phi(t_8, t_0))} && \text{– moduł jw. lecz w 2 fazie betonowania,} \\
 E_{c3} &= \frac{E_c}{(1 + \phi(t_7, t_0))} && \text{– moduł jw. lecz w 3 fazie betonowania,} \\
 E_{c4} &= \frac{E_c}{(1 + \phi(t_6, t_0))} && \text{– moduł jw. lecz w 4 fazie betonowania,} \\
 E_{c5} &= \frac{E_c}{(1 + \phi(t_5, t_0))} && \text{– moduł jw. lecz w 5 fazie betonowania,} \\
 E_{c6} &= \frac{E_c}{(1 + \phi(t_4, t_0))} && \text{– moduł jw. lecz w 6 fazie betonowania,} \\
 E_{c7} &= \frac{E_c}{(1 + \phi(t_3, t_0))} && \text{– moduł jw. lecz w 7 fazie betonowania,} \\
 E_{c8} &= \frac{E_c}{(1 + \phi(t_2, t_0))} && \text{– moduł jw. lecz w 8 fazie betonowania,} \\
 E_{c9} &= \frac{E_c}{(1 + \phi(t_1, t_0))} && \text{– moduł jw. lecz w 9 fazie betonowania.}
 \end{aligned}
 \tag{5.3}$$

### 5.6.2 Sprowadzone pole powierzchni przekroju zespolonego

$$\begin{aligned}
 A_{c1} &= A_p + \frac{E_{c1}}{E_{cp}} \cdot A_m && \text{– sprowadzone pole powierzchni segmentów betonowanych w fazie 1,} \\
 A_{c2} &= A_p + \frac{E_{c2}}{E_{cp}} \cdot A_m && \text{– jw. lecz betonowanych w fazie 2,} \\
 A_{c3} &= A_p + \frac{E_{c3}}{E_{cp}} \cdot A_m && \text{– jw. lecz betonowanych w fazie 3,} \\
 A_{c4} &= A_p + \frac{E_{c4}}{E_{cp}} \cdot A_m && \text{– jw. lecz betonowanych w fazie 4,} \\
 A_{c5} &= A_p + \frac{E_{c5}}{E_{cp}} \cdot A_m && \text{– jw. lecz betonowanych w fazie 5,} \\
 A_{c6} &= A_p + \frac{E_{c6}}{E_{cp}} \cdot A_m && \text{– jw. lecz betonowanych w fazie 6,} \\
 A_{c7} &= A_p + \frac{E_{c7}}{E_{cp}} \cdot A_m && \text{– jw. lecz betonowanych w fazie 7,} \\
 A_{c8} &= A_p + \frac{E_{c8}}{E_{cp}} \cdot A_m && \text{– jw. lecz betonowanych w fazie 8,} \\
 A_{c9} &= A_p + \frac{E_{c9}}{E_{cp}} \cdot A_m && \text{– jw. lecz betonowanych w fazie 9.}
 \end{aligned}
 \tag{5.4}$$

$A = B \cdot U(x)$  - całkowite pole przekroju betonowego,

$A_p = 4b_p h_p$  - pole przekroju łuków prefabrykowanych,

$A_m = A - A_p$  - pole przekroju świeżego betonu.

### 5.6.3 Sprowadzony moment statyczny przekroju zespolonego

$$\begin{aligned} S_1 &= \left(1 - \frac{E_{c1}}{E_{cp}}\right) \cdot A_p \cdot \frac{h_p}{2} + A \cdot U(x) \cdot \frac{E_{c1}}{2E_{cp}}, & S_2 &= \left(1 - \frac{E_{c2}}{E_{cp}}\right) \cdot A_p \cdot \frac{h_p}{2} + A \cdot U(x) \cdot \frac{E_{c2}}{2E_{cp}}, \\ S_3 &= \left(1 - \frac{E_{c3}}{E_{cp}}\right) \cdot A_p \cdot \frac{h_p}{2} + A \cdot U(x) \cdot \frac{E_{c3}}{2E_{cp}}, & S_4 &= \left(1 - \frac{E_{c4}}{E_{cp}}\right) \cdot A_p \cdot \frac{h_p}{2} + A \cdot U(x) \cdot \frac{E_{c4}}{2E_{cp}}, \\ S_5 &= \left(1 - \frac{E_{c5}}{E_{cp}}\right) \cdot A_p \cdot \frac{h_p}{2} + A \cdot U(x) \cdot \frac{E_{c5}}{2E_{cp}}, & S_6 &= \left(1 - \frac{E_{c6}}{E_{cp}}\right) \cdot A_p \cdot \frac{h_p}{2} + A \cdot U(x) \cdot \frac{E_{c6}}{2E_{cp}}, \\ S_7 &= \left(1 - \frac{E_{c7}}{E_{cp}}\right) \cdot A_p \cdot \frac{h_p}{2} + A \cdot U(x) \cdot \frac{E_{c7}}{2E_{cp}}, & S_8 &= \left(1 - \frac{E_{c8}}{E_{cp}}\right) \cdot A_p \cdot \frac{h_p}{2} + A \cdot U(x) \cdot \frac{E_{c8}}{2E_{cp}}, \\ S_9 &= \left(1 - \frac{E_{c9}}{E_{cp}}\right) \cdot A_p \cdot \frac{h_p}{2} + A \cdot U(x) \cdot \frac{E_{c9}}{2E_{cp}}. \end{aligned} \tag{5.5}$$

### 5.6.4 Położenie osi obojętnej

$$\begin{aligned} h_1 &= \frac{S_1}{A_{c1}}, & h_2 &= \frac{S_2}{A_{c2}}, & h_3 &= \frac{S_3}{A_{c3}}, & h_4 &= \frac{S_4}{A_{c4}}, & h_5 &= \frac{S_5}{A_{c5}}, \\ h_6 &= \frac{S_6}{A_{c6}}, & h_7 &= \frac{S_7}{A_{c7}}, & h_8 &= \frac{S_8}{A_{c8}}, & h_9 &= \frac{S_9}{A_{c9}}. \end{aligned} \tag{5.6}$$

### 5.6.5 Sprowadzony moment bezwładności przekroju zespolonego

$$\begin{aligned}
 I &= \frac{B \cdot U(x)^3}{12} && \text{– moment bezwładności przekroju betonowego,} \\
 I_p &= \frac{b_p h_p^3}{12} && \text{– moment bezwładności przekroju prefabrykowanego,} \\
 I_{c1} &= \left(1 - \frac{E_{c1}}{E_{cp}}\right) \left(I_p + A_p \cdot \left(\frac{h_p}{2} - h_1\right)^2\right) + \frac{E_{c1}}{E_{cp}} \left(I + A \cdot \left(\frac{U(x)}{2} - h_1\right)^2\right), \\
 I_{c2} &= \left(1 - \frac{E_{c2}}{E_{cp}}\right) \left(I_p + A_p \cdot \left(\frac{h_p}{2} - h_1\right)^2\right) + \frac{E_{c2}}{E_{cp}} \left(I + A \cdot \left(\frac{U(x)}{2} - h_2\right)^2\right), \\
 I_{c3} &= \left(1 - \frac{E_{c3}}{E_{cp}}\right) \left(I_p + A_p \cdot \left(\frac{h_p}{2} - h_1\right)^2\right) + \frac{E_{c3}}{E_{cp}} \left(I + A \cdot \left(\frac{U(x)}{2} - h_3\right)^2\right), \\
 I_{c4} &= \left(1 - \frac{E_{c4}}{E_{cp}}\right) \left(I_p + A_p \cdot \left(\frac{h_p}{2} - h_1\right)^2\right) + \frac{E_{c4}}{E_{cp}} \left(I + A \cdot \left(\frac{U(x)}{2} - h_4\right)^2\right), \\
 I_{c5} &= \left(1 - \frac{E_{c5}}{E_{cp}}\right) \left(I_p + A_p \cdot \left(\frac{h_p}{2} - h_1\right)^2\right) + \frac{E_{c5}}{E_{cp}} \left(I + A \cdot \left(\frac{U(x)}{2} - h_5\right)^2\right), \\
 I_{c6} &= \left(1 - \frac{E_{c6}}{E_{cp}}\right) \left(I_p + A_p \cdot \left(\frac{h_p}{2} - h_1\right)^2\right) + \frac{E_{c6}}{E_{cp}} \left(I + A \cdot \left(\frac{U(x)}{2} - h_6\right)^2\right), \\
 I_{c7} &= \left(1 - \frac{E_{c7}}{E_{cp}}\right) \left(I_p + A_p \cdot \left(\frac{h_p}{2} - h_1\right)^2\right) + \frac{E_{c7}}{E_{cp}} \left(I + A \cdot \left(\frac{U(x)}{2} - h_7\right)^2\right), \\
 I_{c8} &= \left(1 - \frac{E_{c8}}{E_{cp}}\right) \left(I_p + A_p \cdot \left(\frac{h_p}{2} - h_1\right)^2\right) + \frac{E_{c8}}{E_{cp}} \left(I + A \cdot \left(\frac{U(x)}{2} - h_8\right)^2\right), \\
 I_{c9} &= \left(1 - \frac{E_{c9}}{E_{cp}}\right) \left(I_p + A_p \cdot \left(\frac{h_p}{2} - h_1\right)^2\right) + \frac{E_{c9}}{E_{cp}} \left(I + A \cdot \left(\frac{U(x)}{2} - h_9\right)^2\right).
 \end{aligned} \tag{5.7}$$

### 5.6.6 Charakterystyki geometryczne przekroju całego obiektu

$$\begin{aligned}
A_1 &= A_p, \\
A_2 &= A_p(w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5 + w_6 + w_7 + w_8 + w_{11} + w_{12} + w_{13} + w_{14} + w_{15}) + \\
&A_{c1}(w_9 + w_{10} + w_{16}), \\
A_3 &= A_p(w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5 + w_6 + w_7 + w_{12} + w_{13} + w_{14}) + \\
&A_{c1}(w_8 + w_{11} + w_{15}) + A_{c2}(w_9 + w_{10} + w_{16}), \\
A_4 &= A_p(w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5 + w_6 + w_{13} + w_{14}) + \\
&A_{c1}(w_7 + w_{12} + w_{14}) + A_{c2}(w_8 + w_{11} + w_{15}) + A_{c3}(w_9 + w_{10} + w_{16}), \\
A_5 &= A_p(w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5) + A_{c1}(w_6 + w_{13}) + A_{c2}(w_7 + w_{12} + w_{14}) + \\
&A_{c3}(w_8 + w_{11} + w_{15}) + A_{c4}(w_9 + w_{10} + w_{16}), \\
A_6 &= A_p(w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5) + A_{c1}w_5 + A_{c2}(w_6 + w_{13}) + \\
&A_{c3}(w_7 + w_{12} + w_{14}) + A_{c4}(w_8 + w_{11} + w_{15}) + A_{c5}(w_9 + w_{10} + w_{16}), \\
A_7 &= A_p(w_1 + w_2 + w_3) + A_{c1}w_4 + A_{c2}w_5 + A_{c3}(w_6 + w_{13}) + A_{c4}(w_7 + w_{12} + w_{14}) + \\
&A_{c5}(w_8 + w_{11} + w_{15}) + A_{c6}(w_9 + w_{10} + w_{16}), \\
A_8 &= A_p(w_1 + w_2) + A_{c1}w_3 + A_{c2}w_4 + A_{c3}w_5 + A_{c4}(w_6 + w_{13}) + \\
&A_{c5}(w_7 + w_{12} + w_{14}) + A_{c6}(w_8 + w_{11} + w_{15}) + A_{c7}(w_9 + w_{10} + w_{16}), \\
A_9 &= A_pw_1 + A_{c1}w_3 + A_{c2}w_3 + A_{c3}w_4 + A_{c4}w_5 + \\
&A_{c5}(w_6 + w_{13}) + A_{c6}(w_7 + w_{12} + w_{14}) + A_{c7}(w_8 + w_{11} + w_{15}) + A_{c8}(w_9 + w_{10} + w_{16}), \\
A_{10} &= A_{c1}w_1 + A_{c2}w_2 + A_{c3}w_3 + A_{c4}w_4 + \\
&A_{c5}w_5 + A_{c6}(w_6 + w_{13}) + A_{c7}(w_7 + w_{12} + w_{14}) + A_{c8}(w_8 + w_{11} + w_{15}) + A_{c9}(w_9 + w_{10} + w_{16}). \\
A_{11} &= A
\end{aligned}
\tag{5.8}$$

$$\begin{aligned}
I_1 &= I_p, \\
I_2 &= I_p(w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5 + w_6 + w_7 + w_8 + w_{11} + w_{12} + w_{13} + w_{14} + w_{15}) + \\
&I_{c1}(w_9 + w_{10} + w_{16}), \\
I_3 &= I_p(w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5 + w_6 + w_7 + w_{12} + w_{13} + w_{14}) + \\
&I_{c1}(w_8 + w_{11} + w_{15}) + I_{c2}(w_9 + w_{10} + w_{16}), \\
I_4 &= I_p(w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5 + w_6 + w_{13} + w_{13}) + \\
&I_{c1}(w_7 + w_{12} + w_{14}) + I_{c2}(w_8 + w_{11} + w_{15}) + I_{c3}(w_9 + w_{10} + w_{16}), \\
I_5 &= I_p(w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5) + I_{c1}(w_6 + w_{13}) + I_{c2}(w_7 + w_{12} + w_{14}) + \\
&I_{c3}(w_8 + w_{11} + w_{15}) + I_{c4}(w_9 + w_{10} + w_{16}), \\
I_6 &= I_p(w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5) + I_{c1}w_5 + I_{c2}(w_6 + w_{13}) + \\
&I_{c3}(w_7 + w_{12} + w_{14}) + I_{c4}(w_8 + w_{11} + w_{15}) + I_{c5}(w_9 + w_{10} + w_{16}), \\
I_7 &= I_p(w_1 + w_2 + w_3) + I_{c1}w_4 + I_{c2}w_5 + I_{c3}(w_6 + w_{13}) + I_{c4}(w_7 + w_{12} + w_{14}) + \\
&I_{c5}(w_8 + w_{11} + w_{15}) + I_{c6}(w_9 + w_{10} + w_{16}), \\
I_8 &= I_p(w_1 + w_2) + I_{c1}w_3 + I_{c2}w_4 + I_{c3}w_5 + I_{c4}(w_6 + w_{13}) + \\
&I_{c5}(w_7 + w_{12} + w_{14}) + I_{c6}(w_8 + w_{11} + w_{15}) + I_{c7}(w_9 + w_{10} + w_{16}), \\
I_9 &= I_pw_1 + I_{c1}w_3 + I_{c2}w_3 + I_{c3}w_4 + I_{c4}w_5 + \\
&I_{c5}(w_6 + w_{13}) + I_{c6}(w_7 + w_{12} + w_{14}) + I_{c7}(w_8 + w_{11} + w_{15}) + I_{c8}(w_9 + w_{10} + w_{16}), \\
I_{10} &= I_{c1}w_1 + I_{c2}w_2 + I_{c3}w_3 + I_{c4}w_4 + \\
&I_{c5}w_5 + I_{c6}(w_6 + w_{13}) + I_{c7}(w_7 + w_{12} + w_{14}) + I_{c8}(w_8 + w_{11} + w_{15}) + I_{c9}(w_9 + w_{10} + w_{16}), \\
I_{11} &= A.
\end{aligned}
\tag{5.9}$$

### 5.6.7 Obciążenia odniesione do osi łuku

#### Ciężar własny łuku prefabrykowanego

Ciężar własny łuku prefabrykowanego (centralnego) obciążenie styczne:

$$q_{pm1} = A_p G_c \frac{y}{R_1}.$$

Ciężar własny łuku prefabrykowanego (skrajnego) obciążenie styczne:

$$q_{pm2} = A_p G_c \frac{y - x_2}{R_2}.$$

Ciężar własny łuku prefabrykowanego (centralnego) obciążenie normalne: (5.10)

$$q_{pp1} = A_p G_c \frac{\sqrt{R_1^2 - b_1 y^2}}{R_1}.$$

Ciężar własny łuku prefabrykowanego (skrajnego) obciążenie normalne:

$$q_{pp2} = A_p G_c \frac{\sqrt{R_2^2 - b_2 (y - x_2)^2}}{R_2}.$$

#### Ciężar odparowanej wody

Ciężar własny odparowanej wody (łuk centralny) obciążenie styczne:

$$q_{hn1} = A_m G_w \frac{y}{R_1}.$$

Ciężar własny odparowanej wody (łuk skrajny) obciążenie styczne:

$$q_{hn2} = A_m G_w \frac{y - x_2}{R_2}.$$

Ciężar własny odparowanej wody (łuk centralny) obciążenie normalne: (5.11)

$$q_{hp1} = A_m G_w \frac{\sqrt{R_1^2 - b_1 y^2}}{R_1}.$$

Ciężar własny odparowanej wody (łuk skrajny) obciążenie normalne:

$$q_{hp2} = A_m G_w \frac{\sqrt{R_2^2 - b_2 (y - x_2)^2}}{R_2}.$$

### Ciężar mieszanki betonowej

Ciężar własny mieszanki betonowej (łuk centralny) obciążenie styczne:

$$q_{mn1} = A_m G_m \frac{y}{R_1}.$$

Ciężar własny mieszanki betonowej (łuk skrajny) obciążenie styczne:

$$q_{mn2} = A_m G_m \frac{y - x_2}{R_2}.$$

Ciężar własny mieszanki betonowej (łuk centralny) obciążenie normalne: (5.12)

$$q_{mp1} = A_m G_m \frac{\sqrt{R_1^2 - b_1 y^2}}{R_1}.$$

Ciężar własny mieszanki betonowej (łuk skrajny) obciążenie normalne:

$$q_{mp2} = A_m G_m \frac{\sqrt{R_2^2 - b_2 (y - x_2)^2}}{R_2}.$$

### Obciążenie technologiczne ciągłe

Obciążenie technologiczne ciągłe (łuk centralny) obciążenie styczne:

$$q_{tn1} = q_t x \frac{\sqrt{R_1^2 - b_1 x^2}}{R_1}.$$

Obciążenie technologiczne ciągłe (łuk skrajny) obciążenie styczne:

$$q_{tn2} = q_t (x - x_2) \frac{\sqrt{R_2^2 - b_2 (x - x_2)^2}}{R_2}. \quad (5.13)$$

Obciążenie technologiczne ciągłe (łuk centralny) obciążenie normalne:

$$q_{tp1} = q_t \frac{R_1^2 - x^2}{R_1^2}.$$

Obciążenie technologiczne ciągłe (łuk skrajny) obciążenie normalne:

$$q_{tp2} = q_t \frac{R_2^2 - (x - x_2)^2}{R_2^2}.$$

$G_c, G_w, G_m$  - ciężary właściwe żelbetu, wody, mieszanki.



## Obciążenie wiatrem

Obciążenie wiatrem (łuk centralny) obciążenie styczne:

$$q_{wn1} = q_w x \frac{\sqrt{R_1^2 - b_1 x^2}}{R_1^2}.$$

Obciążenie wiatrem (łuk skrajny) obciążenie styczne:

$$q_{wn2} = q_w (x - x_2) \frac{\sqrt{r_2^2 - b_2 (x - x_2)^2}}{R_2^2}.$$

(5.14)

Obciążenie wiatrem (łuk centralny) obciążenie normalne:

$$q_{wp1} = q_w \frac{R_1^2 - x^2}{R_1^2}.$$

Obciążenie wiatrem (łuk skrajny) obciążenie normalne:

$$q_{wp2} = q_w \frac{R_2^2 - (x - x_2)^2}{R_2^2}.$$

## Obciążenie całkowite styczne

$$n_1 = q_{pn1}(w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5 + w_6 + w_7 + w_8 + w_9) + q_{pn2}(w_{10} + w_{11} + w_{12} + w_{13} + w_{14} + w_{15} + w_{16}) + q_{mn1}w_9 + q_{mn2}(w_{10} + w_{16}) + q_{wn1}w_9 + q_{wn2}(w_{10} + w_{16}),$$

$$n_2 = q_{mn1}w_8 + q_{mn2}(w_{11} + w_{15}) - q_{hn1}w_9 - q_{hn2}(w_{10} + w_{16}) + q_{tn1}w_9 + q_{tn2}(w_{10} + w_{16}) + q_{wn1}w_8 + q_{wn2}(w_{11} + w_{15}),$$

$$n_3 = q_{mn1}w_7 + q_{mn2}(w_{12} + w_{14}) - q_{hn1}w_8 - q_{hn2}(w_{11} + w_{15}) + q_{tn1}w_8 + q_{tn2}(w_{11} + w_{15}) - q_{tn1}w_9 - q_{tn2}(w_{10} + w_{16}) + q_{wn1}w_7 + q_{wn2}(w_{12} + w_{14}),$$

$$n_4 = q_{mn1}w_6 + q_{mn2}w_{13} - q_{hn1}w_7 - q_{hn2}(w_{12} + w_{14}) + q_{tn1}w_7 + q_{tn2}(w_{12} + w_{14}) - q_{tn1}w_8 - q_{tn2}(w_{11} + w_{15}) + q_{wn1}w_6 + q_{wn2}w_{13},$$

$$n_5 = q_{mn1}w_5 - q_{hn1}w_6 - q_{hn2}w_{13} + q_{tn1}w_6 - q_{tn1}w_7 - q_{tn2}(w_{12} + w_{14}) + q_{wn1}w_5,$$

$$n_6 = q_{mn1}w_4 - q_{hn1}w_5 + q_{tn1}w_5 - q_{tn1}w_6 + q_{wn1}w_4,$$

$$n_7 = q_{mn1}w_3 - q_{hn1}w_4 + q_{tn1}w_4 - q_{tn1}w_5 + q_{wn1}w_3,$$

$$n_8 = q_{mn1}w_2 - q_{hn1}w_3 + q_{tn1}w_3 - q_{tn1}w_4 + q_{wn1}w_2,$$

$$n_9 = q_{mn1}w_1 - q_{hn1}w_2 + q_{tn1}w_2 - q_{tn1}w_3 + q_{wn1}w_1,$$

$$n_{10} = p_{05n} + p_{04n} + p_{02n} + p_{054n} + p_{043n} + p_{032n} + p_{021n} - q_{hn1}w_1 - q_{tn1}w_2,$$

$$n_{11} = p_{e5n} + p_{e4n} + p_{e2n}.$$

(5.15)

## Obciążenie całkowite normalne

$$\begin{aligned}
 p_1 &= q_{pp1}(w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5 + w_6 + w_7 + w_8 + w_9) + q_{pp2}(w_{10} + w_{11} + w_{12} \\
 &+ w_{13} + w_{14} + w_{15} + w_{16}) + q_{mp1}w_9 + q_{mp2}(w_{10} + w_{16}) + q_{wp1}w_9 + q_{wp2}(w_{10} + w_{16}), \\
 p_2 &= q_{mp1}w_8 + q_{mp2}(w_{11} + w_{15}) - q_{hp1}w_9 - q_{hp2}(w_{10} + w_{16}) + q_{tp1}w_9 + q_{tp2}(w_{10} + w_{16}) \\
 &+ q_{wp1}w_8 + q_{wp2}(w_{11} + w_{15}), \\
 p_3 &= q_{mp1}w_7 + q_{mp2}(w_{12} + w_{14}) - q_{hp1}w_8 - q_{hp2}(w_{11} + w_{15}) + q_{tp1}w_8 + \\
 &q_{tp2}(w_{11} + w_{15}) - q_{tp1}w_9 - q_{tp2}(w_{10} + w_{16}) + q_{wp1}w_7 + q_{wp2}(w_{12} + w_{14}), \\
 p_4 &= q_{mn1}w_6 + q_{mn2}w_{13} - q_{hn1}w_7 - q_{hn2}(w_{12} + w_{14}) + q_{tn1}w_7 + q_{tn2}(w_{12} + w_{14}) \\
 &- q_{tn1}w_8 - q_{tn2}(w_{11} + w_{15}) + q_{wn1}w_6 + q_{wn2}w_{13}, \\
 p_5 &= q_{mp1}w_5 - q_{hp1}w_6 - q_{hp2}w_{13} + q_{tp1}w_6 - q_{tp1}w_7 - q_{tp2}(w_{12} + w_{14}) + q_{wp1}w_5, \\
 p_6 &= q_{mp1}w_4 - q_{hp1}w_5 + q_{tp1}w_5 - q_{tp1}w_6 + q_{wp1}w_4, \\
 p_7 &= q_{mp1}w_3 - q_{hp1}w_4 + q_{tp1}w_4 - q_{tp1}w_5 + q_{wp1}w_3, \\
 p_8 &= q_{mp1}w_2 - q_{hp1}w_3 + q_{tp1}w_3 - q_{tp1}w_4 + q_{wp1}w_2, \\
 p_9 &= q_{mp1}w_1 - q_{hp1}w_2 + q_{tp1}w_2 - q_{tp1}w_3 + q_{wp1}w_1, \\
 p_{10} &= p_{05p} + p_{04p} + p_{02p} + p_{054p} + p_{043p} + p_{032p} + p_{021p} - q_{hp1}w_1 - q_{tp1}w_2, \\
 p_{11} &= p_{e5p} + p_{e4p} + p_{e2p}.
 \end{aligned} \tag{5.16}$$

## 5.7 Równania stanu

W analizowanym łuku wyróżniono szesnaście przedziałów charakterystycznych (faz). Wykorzystując funkcję indykatorową  $w$  równania stanu zapisano ostatecznie w dwóch przedziałach charakterystycznych. W każdym przedziale charakterystycznym sformułowano 97 równań, po 6 równań dla każdego etapu montażowego łuku ( $6 \times 10 = 60$ ) i  $6 \times 6 = 36$  równań opisujących stany eksploatacji. Siły skupione zastąpiono zastępczym obciążeniem rozłożonym na możliwie najmniejszej długości. Występujące w równaniach stanu wielkości są zamieszczone w dodatku. Dodatkiem jest program fortranowski `user.f`. Zmiennymi stanu są:  $w$  - przemieszczenie prostopadłe do osi,  $\phi$  - przemieszczenie kątowe,  $M$  - moment zginający,  $Q$  - siła poprzeczna,  $u$  - przemieszczenie styczne do osi,  $N$  - siła podłużna,  $V$  - objętość.

## Etap 1

$$\begin{aligned}y'_1 &= \frac{y_5 + y_2 \cdot R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\y'_2 &= \frac{y_3 \cdot R_1}{E_{cp} I_1 \sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\y'_3 &= \frac{y_4 \cdot R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\y'_4 &= \frac{-y_6 - (p_1 + w_{s8} p_{rp}) R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\y'_5 &= \frac{\frac{y_6 R_1}{E_{cp} A_1} + y_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\y'_6 &= \frac{y_4 - (n_1 + w_{s8} p_{rm}) R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}.\end{aligned}\tag{5.17}$$

## Etap 2

$$\begin{aligned}y'_7 &= \frac{y_{11} + y_8 \cdot R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\y'_8 &= \frac{y_9 \cdot R_1}{E_{cp} I_2 \sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\y'_9 &= \frac{y_{10} \cdot R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\y'_{10} &= \frac{-y_{12} - (p_2 + (p_2 + (w_{s7} - w_{s8}) p_{rp} + p_{tp} w_{s8}) R_1)}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\y'_{11} &= \frac{\frac{y_{12} R_1}{E_{cp} A_2} + y_7}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\y'_{12} &= \frac{y_{10} - (n_2 + (w_{s7} - w_{s8}) p_{rn} + p_{tn} w_{s8}) R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}.\end{aligned}\tag{5.18}$$

### Etap 3

$$\begin{aligned}
 y'_{13} &= \frac{y_{17} + y_{14} \cdot R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{14} &= \frac{y_{15} \cdot R_1}{E_{cp} I_3 \sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{15} &= \frac{y_{16} \cdot R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{16} &= \frac{-y_{18} - (p_3 + (w_{s6} - w_{s7})p_{rp} + p_{tp}(w_{s7} - w_{s8}))R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{17} &= \frac{\frac{y_{18}R_1}{E_{cp}A_3} + y_{13}}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{18} &= \frac{y_{16} - (n_3 + (w_{s6} - w_{s7})p_{rn} + p_{tn}(w_{s7} - w_{s8}))R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}.
 \end{aligned} \tag{5.19}$$

### Etap 4

$$\begin{aligned}
 y'_{19} &= \frac{y_{23} + y_{20} \cdot R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{20} &= \frac{y_{21} \cdot R_1}{E_{cp} I_4 \sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{21} &= \frac{y_{22} \cdot R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{22} &= \frac{-y_{24} - (p_4 + (w_{s5} - w_{s6})p_{rp} + p_{tp}(w_{s6} - w_{s7}))R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{23} &= \frac{\frac{y_{24}R_1}{E_{cp}A_4} + y_{19}}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{24} &= \frac{y_{22} - (n_4 + (w_{s5} - w_{s6})p_{rn} + p_{tn}(w_{s6} - w_{s7}))R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}.
 \end{aligned} \tag{5.20}$$

## Etap 5

$$\begin{aligned}
 y'_{25} &= \frac{y_{29} + y_{26} \cdot R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{26} &= \frac{y_{27} \cdot R_1}{E_{cp} I_5 \sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{27} &= \frac{y_{28} \cdot R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{28} &= \frac{-y_{30} - (p_5 + (w_{s4} - w_{s5})p_{rp} + p_{tp}(w_{s5} - w_{s6}))R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{29} &= \frac{\frac{y_{30}R_1}{E_{cp}A_5} + y_{25}}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{30} &= \frac{y_{28} - (n_5 + (w_{s4} - w_{s5})p_{rn} + p_{tn}(w_{s5} - w_{s6}))R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}.
 \end{aligned} \tag{5.21}$$

## Etap 6

$$\begin{aligned}
 y'_{31} &= \frac{y_{35} + y_{32} \cdot R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{32} &= \frac{y_{33} \cdot R_1}{E_{cp} I_6 \sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{33} &= \frac{y_{34} \cdot R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{34} &= \frac{-y_{36} - (p_6 + (w_{s3} - w_{s4})p_{rp} + p_{tp}(w_{s4} - w_{s5}))R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{35} &= \frac{\frac{y_{36}R_1}{E_{cp}A_6} + y_{31}}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{36} &= \frac{y_{34} - (n_6 + (w_{s3} - w_{s4})p_{rn} + p_{tn}(w_{s4} - w_{s5}))R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}.
 \end{aligned} \tag{5.22}$$

## Etap 7

$$\begin{aligned}
 y'_{37} &= \frac{y_{41} + y_{38} \cdot R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{38} &= \frac{y_{39} \cdot R_1}{E_{cp} I_7 \sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{39} &= \frac{y_{40} \cdot R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{40} &= \frac{-y_{42} - (p_7 + (w_{s2} - w_{s3})p_{rp} + p_{tp}(w_{s3} - w_{s4}))R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{41} &= \frac{\frac{y_{42}R_1}{E_{cp}A_7} + y_{37}}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{42} &= \frac{y_{40} - (n_7 + (w_{s2} - w_{s3})p_{rn} + p_{tn}(w_{s3} - w_{s4}))R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}.
 \end{aligned} \tag{5.23}$$

## Etap 8

$$\begin{aligned}
 y'_{43} &= \frac{y_{47} + y_{44} \cdot R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{44} &= \frac{y_{45} \cdot R_1}{E_{cp} I_8 \sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{45} &= \frac{y_{46} \cdot R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{46} &= \frac{-y_{48} - (p_8 + (w_{s1} - w_{s2})p_{rp} + p_{tp}(w_{s2} - w_{s3}))R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{47} &= \frac{\frac{y_{48}R_1}{E_{cp}A_8} + y_{43}}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{48} &= \frac{y_{46} - (n_8 + (w_{s1} - w_{s2})p_{rn} + p_{tn}(w_{s2} - w_{s3}))R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}.
 \end{aligned} \tag{5.24}$$

## Etap 9

$$\begin{aligned}
 y'_{49} &= \frac{y_{53} + y_{50} \cdot R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{50} &= \frac{y_{51} \cdot R_1}{E_{cp} I_9 \sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{51} &= \frac{y_{52} \cdot R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{52} &= \frac{-y_{54} - (p_9 + (w_{s0} - w_{s1})p_{rp} + p_{tp}(w_{s1} - w_{s2}))R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{53} &= \frac{\frac{y_{54}R_1}{E_{cp}A_9} + y_{49}}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{54} &= \frac{y_{52} - (n_9 + (w_{s0} - w_{s1})p_{rn} + p_{tn}(w_{s1} - w_{s2}))R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}.
 \end{aligned} \tag{5.25}$$

## Etap 10

$$\begin{aligned}
 y'_{55} &= \frac{y_{59} + y_{56} \cdot R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{56} &= \frac{y_{57} \cdot R_1}{E_{cp} I_{10} \sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{57} &= \frac{y_{58} \cdot R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{58} &= \frac{-y_{60} - (p_{10} - w_{s0}p_{rp} - p_{tp}w_{s1})R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{59} &= \frac{\frac{y_{60}R_1}{E_{cp}A_{10}} + y_{55}}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{60} &= \frac{y_{58} - (n_{10} - w_{s0}p_{rn} - p_{tn}w_{s1})R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}.
 \end{aligned} \tag{5.26}$$

## Stan 1 - eksploatacja

$$\begin{aligned}y'_{61} &= \frac{y_{65} + y_{62} \cdot R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\y'_{62} &= \frac{y_{63} \cdot R_1}{E_{ce} I_{11} \sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\y'_{63} &= \frac{y_{64} \cdot R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\y'_{64} &= \frac{-y_{66} - p_{11} R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\y'_{65} &= \frac{\frac{y_{66} R_1}{E_{ce} A_{11}} + y_{61}}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\y'_{66} &= \frac{y_{64} - n_{11} R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}.\end{aligned}\tag{5.27}$$

## Stan 2 - eksploatacja

$$\begin{aligned}y'_{67} &= \frac{y_{71} + y_{68} \cdot R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\y'_{68} &= \frac{y_{69} \cdot R_1}{E_{cp} I_{11} \sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\y'_{69} &= \frac{y_{70} \cdot R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\y'_{70} &= \frac{-y_{72} - p_{k1p} R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\y'_{71} &= \frac{\frac{y_{72} R_1}{E_{cp} A_{11}} + y_{67}}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\y'_{72} &= \frac{y_{70} - p_{k1n} R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}.\end{aligned}\tag{5.28}$$



### Stan 3 - eksploatacja

$$\begin{aligned}
 y'_{73} &= \frac{y_{77} + y_{74} \cdot R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{74} &= \frac{y_{75} \cdot R_1}{E_{cp} I_{11} \sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{75} &= \frac{y_{76} \cdot R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{76} &= \frac{-y_{78} - p_{k2p} R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{77} &= \frac{\frac{y_{78} R_1}{E_{cp} A_{11}} + y_{73}}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{78} &= \frac{y_{76} - p_{k2n} R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}.
 \end{aligned} \tag{5.29}$$

### Stan 4 - eksploatacja

$$\begin{aligned}
 y'_{79} &= \frac{y_{83} + y_{80} \cdot R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{80} &= \frac{y_{81} \cdot R_1}{E_{cp} I_{11} \sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{81} &= \frac{y_{82} \cdot R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{82} &= \frac{-y_{84} - p_{k3p} R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{83} &= \frac{\frac{y_{84} R_1}{E_{cp} A_{11}} + y_{79}}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{84} &= \frac{y_{82} - p_{k3n} R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}.
 \end{aligned} \tag{5.30}$$

### Stan 5 - eksploatacja

$$\begin{aligned}
 y'_{85} &= \frac{y_{89} + y_{86} \cdot R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{86} &= \frac{y_{87} \cdot R_1}{E_{cp} I_{11} \sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{87} &= \frac{y_{88} \cdot R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{88} &= \frac{-y_{90} - p_{k4p} R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{89} &= \frac{\frac{y_{90} R_1}{E_{cp} A_{11}} + y_{85}}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{90} &= \frac{y_{88} - p_{k4n} R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}.
 \end{aligned} \tag{5.31}$$

### Stan 6 - eksploatacja

$$\begin{aligned}
 y'_{91} &= \frac{y_{95} + y_{92} \cdot R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{92} &= \frac{y_{93} \cdot R_1}{E_{cp} I_{11} \sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{93} &= \frac{y_{94} \cdot R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{94} &= \frac{-y_{96} - p_{k5p} R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{95} &= \frac{\frac{y_{96} R_1}{E_{cp} A_{11}} + y_{91}}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
 y'_{96} &= \frac{y_{94} - p_{k5n} R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}.
 \end{aligned} \tag{5.32}$$

### Objętość

$$\begin{aligned}
 y'_{97} &= \frac{AR_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}} \\
 x &\in [0, 30].
 \end{aligned} \tag{5.33}$$

Dla drugiej fazy  $x \in [30, 55.9]$  równania stanu zostaną zapisane podobnie.

### Etap 1

$$\begin{aligned}
 y'_1 &= \frac{y_5 + y_2 \cdot R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\
 y'_2 &= \frac{y_3 \cdot R_2}{E_{cp} I_1 \sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\
 y'_3 &= \frac{y_4 \cdot R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\
 y'_4 &= \frac{-y_6 - (p_1 + p_{rp}(w_{s10} + w_{s15}))R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\
 y'_5 &= \frac{\frac{y_6 R_2}{E_{cp} A_1} + y_1}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\
 y'_6 &= \frac{y_4 - (n_1 + (w_{s10} + w_{s15})p_{rn})R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}.
 \end{aligned} \tag{5.34}$$

### Etap 2

$$\begin{aligned}
 y'_7 &= \frac{y_{11} + y_8 \cdot R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\
 y'_8 &= \frac{y_9 \cdot R_2}{E_{cp} I_2 \sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\
 y'_9 &= \frac{y_{10} \cdot R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\
 y'_{10} &= \frac{-y_{12} - (p_2 + (-w_{s10} + w_{s11} + w_{s14} - w_{s15})p_{rp} + p_{tp}(w_{s10} + w_{s15}))R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\
 y'_{11} &= \frac{\frac{y_{12} R_2}{E_{cp} A_2} + y_7}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\
 y'_{12} &= \frac{y_{10} - (n_2 + (-w_{s10} + w_{s11} + w_{s14} - w_{s15})p_{rn} + p_{tn}(w_{s10} + w_{s15}))R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}.
 \end{aligned} \tag{5.35}$$

### Etap 3

$$\begin{aligned}
y'_{13} &= \frac{y_{17} + y_{14} \cdot R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\
y'_{14} &= \frac{y_{15} \cdot R_2}{E_{cp} I_3 \sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\
y'_{15} &= \frac{y_{16} \cdot R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\
y'_{16} &= \frac{-y_{18} - (p_3 + (-w_{s11} + w_{s12} + w_{s13} - w_{s14})p_{rp} + p_{tp}(-w_{s11} + w_{s12} + w_{s13} - w_{s14}))R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\
y'_{17} &= \frac{\frac{y_{18}R_2}{E_{cp}A_3} + y_{13}}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\
y'_{18} &= \frac{y_{16} - (n_3 + (-w_{s11} + w_{s12} + w_{s13} - w_{s14})p_{rn} + p_{tn}(-w_{s10} + w_{s11} + w_{s14} - w_{s15}))R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}.
\end{aligned} \tag{5.36}$$

### Etap 4

$$\begin{aligned}
y'_{19} &= \frac{y_{23} + y_{20} \cdot R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\
y'_{20} &= \frac{y_{21} \cdot R_2}{E_{cp} I_4 \sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}}, \\
y'_{21} &= \frac{y_{22} \cdot R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\
y'_{22} &= \frac{-y_{24} - (p_4 - w_{s12}p_{rp} + p_{tp}(-w_{s11} + w_{s12} + w_{s13} - w_{s14}))R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\
y'_{23} &= \frac{\frac{y_{24}R_2}{E_{cp}A_4} + y_{19}}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\
y'_{24} &= \frac{y_{22} - (n_4 - w_{s12}p_{rn} + p_{tn}(-w_{s11} + w_{s12} + w_{s13} - w_{s14}))R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}.
\end{aligned} \tag{5.37}$$

## Etap 5

$$\begin{aligned}
 y'_{25} &= \frac{y_{29} + y_{26} \cdot R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\
 y'_{26} &= \frac{y_{27} \cdot R_2}{E_{cp} I_5 \sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\
 y'_{27} &= \frac{y_{28} \cdot R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\
 y'_{28} &= \frac{-y_{30} - (p_5 + w_{s13} p_{rp} + p_{tp}(w_{s12} + w_{s13})) R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\
 y'_{29} &= \frac{\frac{y_{30} R_2}{E_{cp} A_5} + y_{25}}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\
 y'_{30} &= \frac{y_{28} - (n_5 - w_{s13} p_{rn} + p_{tn}(w_{s12} + w_{s13})) R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}},
 \end{aligned} \tag{5.38}$$

## Etap 6

$$\begin{aligned}
 y'_{31} &= \frac{y_{35} + y_{32} \cdot R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\
 y'_{32} &= \frac{y_{33} \cdot R_2}{E_{cp} I_6 \sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\
 y'_{33} &= \frac{y_{34} \cdot R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\
 y'_{34} &= \frac{-y_{36} - p_6 R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\
 y'_{35} &= \frac{\frac{y_{36} R_2}{E_{cp} A_6} + y_{31}}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\
 y'_{36} &= \frac{y_{34} - n_6 R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}.
 \end{aligned} \tag{5.39}$$

## Etap 7

$$\begin{aligned}y'_{37} &= \frac{y_{41} + y_{38} \cdot R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\y'_{38} &= \frac{y_{39} \cdot R_2}{E_{cp} I_7 \sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\y'_{39} &= \frac{y_{40} \cdot R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\y'_{40} &= \frac{-y_{42} - p_7 R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\y'_{41} &= \frac{\frac{y_{42} R_2}{E_{cp} A_7} + y_{37}}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\y'_{42} &= \frac{y_{40} - n_7 R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}.\end{aligned}\tag{5.40}$$

## Etap 8

$$\begin{aligned}y'_{43} &= \frac{y_{47} + y_{44} \cdot R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\y'_{44} &= \frac{y_{45} \cdot R_2}{E_{cp} I_8 \sqrt{(R_1^2 - (x - x_2)^2)}}, \\y'_{45} &= \frac{y_{46} \cdot R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\y'_{46} &= \frac{-y_{48} - p_8 R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\y'_{47} &= \frac{\frac{y_{48} R_2}{E_{cp} A_8} + y_{43}}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\y'_{48} &= \frac{y_{46} - n_8 R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}.\end{aligned}\tag{5.41}$$

## Etap 9

$$\begin{aligned}y'_{49} &= \frac{y_{53} + y_{50} \cdot R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\y'_{50} &= \frac{y_{51} \cdot R_2}{E_{cp} I_9 \sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\y'_{51} &= \frac{y_{52} \cdot R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\y'_{52} &= \frac{-y_{54} - p_9 R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\y'_{53} &= \frac{\frac{y_{54} R_2}{E_{cp} A_9} + y_{49}}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\y'_{54} &= \frac{y_{52} - n_9 R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}.\end{aligned}\tag{5.42}$$

## Etap 10

$$\begin{aligned}y'_{55} &= \frac{y_{59} + y_{56} \cdot R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\y'_{56} &= \frac{y_{57} \cdot R_2}{E_{cp} I_{10} \sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\y'_{57} &= \frac{y_{58} \cdot R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\y'_{58} &= \frac{-y_{60} - p_{10} R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\y'_{59} &= \frac{\frac{y_{60} R_2}{E_{cp} A_{10}} + y_{55}}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\y'_{60} &= \frac{y_{58} - n_{10} R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}.\end{aligned}\tag{5.43}$$

## Stan 1 - eksploatacja

$$\begin{aligned}y'_{61} &= \frac{y_{65} + y_{62} \cdot R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\y'_{62} &= \frac{y_{63} \cdot R_2}{E_{ce} I_{11} \sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\y'_{63} &= \frac{y_{64} \cdot R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\y'_{64} &= \frac{-y_{66} - p_{11} R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\y'_{65} &= \frac{\frac{y_{66} R_2}{E_{ce} A_{11}} + y_{61}}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}, \\y'_{66} &= \frac{y_{64} - n_{11} R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}}.\end{aligned}\tag{5.44}$$

## Stan 2 - eksploatacja

$$\begin{aligned}y'_{67} &= \frac{y_{71} + y_{68} \cdot R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_1)^2)}}, \\y'_{68} &= \frac{y_{69} \cdot R_2}{E_{cp} I_{11} \sqrt{(R_2^2 - (x - x_1)^2)}}, \\y'_{69} &= \frac{y_{70} \cdot R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_1)^2)}}, \\y'_{70} &= \frac{-y_{72} - p_{k1p} R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_1)^2)}}, \\y'_{71} &= \frac{\frac{y_{72} R_2}{E_{cp} A_{11}} + y_{67}}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_1)^2)}}, \\y'_{72} &= \frac{y_{70} - p_{k1n} R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_1)^2)}}.\end{aligned}\tag{5.45}$$



### Stan 3 - eksploatacja

$$\begin{aligned}y'_{73} &= \frac{y_{77} + y_{74} \cdot R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_1)^2)}}, \\y'_{74} &= \frac{y_{75} \cdot R_2}{E_{cp} I_{11} \sqrt{(R_2^2 - (x - x_1)^2)}}, \\y'_{75} &= \frac{y_{76} \cdot R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_1)^2)}}, \\y'_{76} &= \frac{-y_{78} - p_{k2p} R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_1)^2)}}, \\y'_{77} &= \frac{\frac{y_{78} R_2}{E_{cp} A_{11}} + y_{73}}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_1)^2)}}, \\y'_{78} &= \frac{y_{76} - p_{k2n} R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_1)^2)}}.\end{aligned}\tag{5.46}$$

### Stan 4 - eksploatacja

$$\begin{aligned}y'_{79} &= \frac{y_{83} + y_{80} \cdot R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_1)^2)}}, \\y'_{80} &= \frac{y_{81} \cdot R_2}{E_{cp} I_{11} \sqrt{(R_2^2 - (x - x_1)^2)}}, \\y'_{81} &= \frac{y_{82} \cdot R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_1)^2)}}, \\y'_{82} &= \frac{-y_{84} - p_{k3p} R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_1)^2)}}, \\y'_{83} &= \frac{\frac{y_{84} R_2}{E_{cp} A_{11}} + y_{79}}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_1)^2)}}, \\y'_{84} &= \frac{y_{82} - p_{k3n} R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_1)^2)}}.\end{aligned}\tag{5.47}$$

## Stan 5 - eksploatacja

$$\begin{aligned}y'_{85} &= \frac{y_{89} + y_{86} \cdot R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_1)^2)}}, \\y'_{86} &= \frac{y_{87} \cdot R_2}{E_{cp} I_{11} \sqrt{(R_2^2 - (x - x_1)^2)}}, \\y'_{87} &= \frac{y_{88} \cdot R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_1)^2)}}, \\y'_{88} &= \frac{-y_{90} - p_{k4p} R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_1)^2)}}, \\y'_{89} &= \frac{\frac{y_{90} R_2}{E_{cp} A_{11}} + y_{85}}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_1)^2)}}, \\y'_{90} &= \frac{y_{88} - p_{k4n} R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_1)^2)}}.\end{aligned}\tag{5.48}$$

## Stan 6 - eksploatacja

$$\begin{aligned}y'_{91} &= \frac{y_{95} + y_{92} \cdot R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_1)^2)}}, \\y'_{92} &= \frac{y_{93} \cdot R_2}{E_{cp} I_{11} \sqrt{(R_2^2 - (x - x_1)^2)}}, \\y'_{93} &= \frac{y_{94} \cdot R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_1)^2)}}, \\y'_{94} &= \frac{-y_{96} - p_{k5p} R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_1)^2)}}, \\y'_{95} &= \frac{\frac{y_{96} R_2}{E_{cp} A_{11}} + y_{91}}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_1)^2)}}, \\y'_{96} &= \frac{y_{88} - p_{k5n} R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_1)^2)}}.\end{aligned}\tag{5.49}$$

## Objętość

$$\begin{aligned}y'_{97} &= \frac{AR_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}} \\x &\in [30, 55.9].\end{aligned}\tag{5.50}$$

Zmienne stanu zestawione w tabeli Tab.5.1

Tab. 5.1 Zmienne stanu w etapach montażu i eksploatacji

Stan	S1	S2	S3	S4	S5	S5	S7	S8	S9	S10	E1	E2	E3	E4	E5	E6
$w:$	$y_1$	$y_7$	$y_{13}$	$y_{19}$	$y_{25}$	$y_{31}$	$y_{37}$	$y_{43}$	$y_{49}$	$y_{55}$	$y_{61}$	$y_{67}$	$y_{73}$	$y_{79}$	$y_{85}$	$y_{91}$
$\phi:$	$y_2$	$y_8$	$y_{14}$	$y_{20}$	$y_{26}$	$y_{32}$	$y_{38}$	$y_{44}$	$y_{50}$	$y_{56}$	$y_{62}$	$y_{68}$	$y_{74}$	$y_{80}$	$y_{86}$	$y_{92}$
$M:$	$y_3$	$y_9$	$y_{15}$	$y_{21}$	$y_{27}$	$y_{33}$	$y_{39}$	$y_{45}$	$y_{51}$	$y_{57}$	$y_{63}$	$y_{69}$	$y_{75}$	$y_{81}$	$y_{87}$	$y_{93}$
$Q:$	$y_4$	$y_{10}$	$y_{16}$	$y_{22}$	$y_{28}$	$y_{34}$	$y_{40}$	$y_{46}$	$y_{52}$	$y_{58}$	$y_{64}$	$y_{70}$	$y_{76}$	$y_{82}$	$y_{88}$	$y_{94}$
$u:$	$y_5$	$y_{11}$	$y_{17}$	$y_{23}$	$y_{29}$	$y_{35}$	$y_{41}$	$y_{47}$	$y_{53}$	$y_{59}$	$y_{65}$	$y_{71}$	$y_{77}$	$y_{83}$	$y_{89}$	$y_{95}$
$N:$	$y_6$	$y_{12}$	$y_{18}$	$y_{24}$	$y_{30}$	$y_{36}$	$y_{42}$	$y_{48}$	$y_{54}$	$y_{60}$	$y_{66}$	$y_{72}$	$y_{78}$	$y_{84}$	$y_{90}$	$y_{96}$
$V:$	$y_{97}$															

## 5.8 Warunki brzegowe

Dla przyjętego schematu statycznego, lewa podpora to utwierdzenie z możliwością pionowego przesuwu dla stanów montażu S1-S10 oraz eksploatacji E1, E4, podpora środkowa utwierdzenie, prawa podpora podparcie przegubowe, warunki brzegowe są następujące: Podpory skrajne ( $L = 55.9$  [m])

$$\begin{aligned}
 & y_2(0) = 0, y_4(0) = 0, y_5(0) = 0, y_8(0) = 0, y_{10}(0) = 0, y_{11}(0) = 0 \\
 & y_{14}(0) = 0, y_{16}(0) = 0, y_{17}(0) = 0, y_{20}(0) = 0, y_{22}(0) = 0, y_{23}(0) = 0, \\
 & y_{26}(0) = 0, y_{28}(0) = 0, y_{29}(0) = 0, y_{32}(0) = 0, y_{34}(0) = 0, y_{35}(0) = 0, \\
 & y_{38}(0) = 0, y_{40}(0) = 0, y_{41}(0) = 0, y_{44}(0) = 0, y_{46}(0) = 0, y_{47}(0) = 0, \\
 & y_{50}(0) = 0, y_{52}(0) = 0, y_{53}(0) = 0, y_{56}(0) = 0, y_{58}(0) = 0, y_{59}(0) = 0, \\
 & y_{62}(0) = 0, y_{64}(0) = 0, y_{65}(0) = 0, y_{80}(0) = 0, y_{82}(0) = 0, y_{83}(0) = 0, \\
 & y_{97}(0) = 0 \\
 & y_1(L) = 0, y_3(L) = 0, y_5(L) = 0, y_7(L) = 0, y_9(L) = 0, y_{11}(L) = 0 \tag{5.51} \\
 & y_{13}(L) = 0, y_{15}(L) = 0, y_{17}(L) = 0, y_{19}(L) = 0, y_{21}(L) = 0, y_{23}(L) = 0, \\
 & y_{25}(L) = 0, y_{27}(L) = 0, y_{29}(L) = 0, y_{31}(L) = 0, y_{33}(L) = 0, y_{35}(L) = 0, \\
 & y_{37}(L) = 0, y_{39}(L) = 0, y_{41}(L) = 0, y_{43}(L) = 0, y_{45}(L) = 0, y_{47}(L) = 0, \\
 & y_{49}(L) = 0, y_{51}(L) = 0, y_{53}(L) = 0, y_{55}(L) = 0, y_{57}(L) = 0, y_{59}(L) = 0, \\
 & y_{61}(L) = 0, y_{63}(L) = 0, y_{65}(L) = 0, y_{67}(L) = 0, y_{69}(L) = 0, y_{71}(L) = 0, \\
 & y_{73}(L) = 0, y_{75}(L) = 0, y_{77}(L) = 0, y_{79}(L) = 0, y_{81}(L) = 0, y_{83}(L) = 0, \\
 & y_{85}(L) = 0, y_{87}(L) = 0, y_{89}(L) = 0, y_{91}(L) = 0, y_{93}(L) = 0, y_{95}(L) = 0.
 \end{aligned}$$

### 5.8.1 Wewnętrzne warunki punktowe

Warunki na podporze środkowej  $L_1 = 30$  [m]):

$$\begin{aligned} y_1(L_1) = 0, y_2(L_1) = 0, y_5(L_1) = 0, y_7(L_1) = 0, y_8(L_1) = 0, y_{11}(L_1) = 0, \\ y_{13}(L_1) = 0, y_{14}(L_1) = 0, y_{17}(L_1) = 0, y_{19}(L_1) = 0, y_{20}(L_1) = 0, y_{23}(L_1) = 0, \\ y_{25}(L_1) = 0, y_{26}(L_1) = 0, y_{29}(L_1) = 0, y_{31}(L_1) = 0, y_{32}(L_1) = 0, y_{35}(L_1) = 0, \\ y_{37}(L_1) = 0, y_{38}(L_1) = 0, y_{41}(L_1) = 0, y_{43}(L_1) = 0, y_{44}(L_1) = 0, y_{47}(L_1) = 0, \\ y_{49}(L_1) = 0, y_{50}(L_1) = 0, y_{53}(L_1) = 0, y_{55}(L_1) = 0, y_{56}(L_1) = 0, y_{59}(L_1) = 0, \\ y_{61}(L_1) = 0, y_{62}(L_1) = 0, y_{65}(L_1) = 0, y_{67}(L_1) = 0, y_{68}(L_1) = 0, y_{71}(L_1) = 0, \\ y_{73}(L_1) = 0, y_{74}(L_1) = 0, y_{77}(L_1) = 0, y_{79}(L_1) = 0, y_{80}(L_1) = 0, y_{83}(L_1) = 0, \\ y_{85}(L_1) = 0, y_{86}(L_1) = 0, y_{89}(L_1) = 0, y_{91}(L_1) = 0, y_{92}(L_1) = 0, y_{95}(L_1) = 0 \quad . \end{aligned} \tag{5.52}$$

Dla stanów eksploatacji E2, E3, E5, E6 formułowane są warunki początkowe typu *implicit*

$$\begin{aligned} y_{67}(0) = y_{91}(0), \quad y_{68}(0) = -y_{92}(0), \quad y_{69}(0) = y_{93}(0), \\ y_{70}(0) = -y_{94}(0), \quad y_{71}(0) = -y_{95}(0), \quad y_{72}(0) = y_{96}(0), \\ y_{73}(0) = y_{85}(0), \quad y_{74}(0) = -y_{86}(0), \quad y_{75}(0) = y_{87}(0), \\ y_{76}(0) = -y_{88}(0), \quad y_{77}(0) = -y_{89}(0), \quad y_{78}(0) = y_{90}(0) \quad . \end{aligned} \tag{5.53}$$

## 5.9 Warunki ograniczające

Warunki ograniczające są typu geometrycznego i dotyczą bezpośrednio zmiennej decyzyjnej (wysokości przekroju poprzecznego łuku)

$$U_1 \leq U(x) \leq U_2 \tag{5.54}$$

Formułowane są również warunki na naprężenia normalne (SGN). Naprężenia normalne w górnych włóknach w poszczególnych stanach montażowych i stanie eksploatacji mają postać:

$$\begin{aligned}
\sigma_{bg1} &= \left( \frac{-y_3 U(x)}{2I_1} + \frac{y_6}{A_1} \right) w_0, \\
\sigma_{bg2} &= \left( \frac{-y_9 U(x)}{2I_2} + \frac{y_{12}}{A_2} \right) (w_9 + w_{10} + w_{16}), \\
\sigma_{bg3} &= \left( \frac{-y_{15} U(x)}{2I_3} + \frac{y_{18}}{A_3} \right) (w_8 + w_9 + w_{10} + w_{11} + w_{15} + w_{16}), \\
\sigma_{bg4} &= \left( \frac{-y_{21} U(x)}{2I_4} + \frac{y_{24}}{A_4} \right) (w_7 + w_8 + w_9 + w_{10} + w_{11} + w_{12} + w_{14} + w_{15} + w_{16}), \\
\sigma_{bg5} &= \left( \frac{-y_{27} U(x)}{2I_5} + \frac{y_{30}}{A_5} \right) (w_6 + w_7 + w_8 + w_9 + w_{10} + w_{11} + w_{12} + w_{13} + w_{14} + w_{15} + w_{16}), \\
\sigma_{bg6} &= \left( \frac{-y_{33} U(x)}{2I_6} + \frac{y_{36}}{A_6} \right) (w_5 + w_6 + w_7 + w_8 + w_9), \\
\sigma_{bg7} &= \left( \frac{-y_{39} U(x)}{2I_7} + \frac{y_{42}}{A_7} \right) (w_4 + w_5 + w_6 + w_7 + w_8 + w_9), \\
\sigma_{bg8} &= \left( \frac{-y_{45} U(x)}{2I_8} + \frac{y_{48}}{A_8} \right) (w_3 + w_4 + w_5 + w_6 + w_7 + w_8 + w_9), \\
\sigma_{bg9} &= \left( \frac{-y_{51} U(x)}{2I_9} + \frac{y_{54}}{A_9} \right) (w_2 + w_3 + w_4 + w_5 + w_6 + w_7 + w_8 + w_9), \\
\sigma_{bg10} &= \left( \frac{-y_{57} U(x)}{2I_{10}} + \frac{y_{60}}{A_{10}} \right), \quad \sigma_{bg11} = \left( \frac{-y_{63} U(x)}{2I_{11}} + \frac{y_{66}}{A_{11}} \right) \\
\sigma_{bgk1} &= \left( \frac{-y_{69} U(x)}{2I_{11}} + \frac{y_{72}}{A_{11}} \right), \quad \sigma_{bgk2} = \left( \frac{-y_{75} U(x)}{2I_{11}} + \frac{y_{78}}{A_{11}} \right), \quad \sigma_{bgk3} = \left( \frac{-y_{81} U(x)}{2I_{11}} + \frac{y_{84}}{A_{11}} \right) \\
\sigma_{bgk4} &= \left( \frac{-y_{87} U(x)}{2I_{11}} + \frac{y_{90}}{A_{11}} \right), \quad \sigma_{bgk5} = \left( \frac{-y_{93} U(x)}{2I_{11}} + \frac{y_{96}}{A_{11}} \right).
\end{aligned} \tag{5.55}$$

Definiujemy dodatkowo wyrażenia

$$\begin{aligned}
\sup_g &= \max(\sigma_{bg10}, \quad \sigma_{bg11} + \max(\sigma_{bgk1}, \sigma_{bgk2}, \sigma_{bgk3}, \sigma_{bgk4}, \sigma_{bgk5})), \\
\inf_g &= \min(\sigma_{bg10}, \quad \sigma_{bg11} + \min(\sigma_{bgk1}, \sigma_{bgk2}, \sigma_{bgk3}, \sigma_{bgk4}, \sigma_{bgk5})).
\end{aligned} \tag{5.56}$$

Naprężenia w górnych włóknach w kolejnych stanach montażowych wynoszą:

$$\begin{aligned}
\sigma_{g1} &= \sigma_{bg1}, \\
\sigma_{g2} &= \sigma_{bg1} + \sigma_{bg2}, \\
\sigma_{g3} &= \sigma_{bg1} + \sigma_{bg2} + \sigma_{bg3}, \\
\sigma_{g4} &= \sigma_{bg1} + \sigma_{bg2} + \sigma_{bg3} + \sigma_{bg4}, \\
\sigma_{g5} &= \sigma_{bg1} + \sigma_{bg2} + \sigma_{bg3} + \sigma_{bg4} + \sigma_{bg5}, \\
\sigma_{g6} &= \sigma_{bg1} + \sigma_{bg2} + \sigma_{bg3} + \sigma_{bg4} + \sigma_{bg5} + \sigma_{bg6}, \\
\sigma_{g7} &= \sigma_{bg1} + \sigma_{bg2} + \sigma_{bg3} + \sigma_{bg4} + \sigma_{bg5} + \sigma_{bg6} + \sigma_{bg7}, \\
\sigma_{g8} &= \sigma_{bg1} + \sigma_{bg2} + \sigma_{bg3} + \sigma_{bg4} + \sigma_{bg5} + \sigma_{bg6} + \sigma_{bg7} + \sigma_{bg8}, \\
\sigma_{g9} &= \sigma_{bg1} + \sigma_{bg2} + \sigma_{bg3} + \sigma_{bg4} + \sigma_{bg5} + \sigma_{bg6} + \sigma_{bg7} + \sigma_{bg8} + \sigma_{bg9}, \\
\sigma_{g10} &= \sigma_{bg1} + \sigma_{bg2} + \sigma_{bg3} + \sigma_{bg4} + \sigma_{bg5} + \sigma_{bg6} + \sigma_{bg7} + \sigma_{bg8} + \sigma_{bg9} + \sigma_{bg10}, \\
\sigma_{g11} &= \sigma_{bg1} + \sigma_{bg2} + \sigma_{bg3} + \sigma_{bg4} + \sigma_{bg5} + \sigma_{bg6} + \sigma_{bg7} + \sigma_{bg8} + \sigma_{bg9} + \sigma_{bg11}.
\end{aligned} \tag{5.57}$$

Naprężenia w dolnych włóknach w stanach montażowych i eksploatacji:

$$\begin{aligned}
\sigma_{bd1} &= \left( \frac{y_3 U(x)}{2I_1} + \frac{y_6}{A_1} \right) w_0, \\
\sigma_{bd2} &= \left( \frac{y_9 U(x)}{2I_2} + \frac{y_{12}}{A_2} \right) (w_9 + w_{10} + w_{16}), \\
\sigma_{bd3} &= \left( \frac{y_{15} U(x)}{2I_3} + \frac{y_{18}}{A_3} \right) (w_8 + w_9 + w_{10} + w_{11} + w_{15} + w_{16}), \\
\sigma_{bd4} &= \left( \frac{y_{21} U(x)}{2I_4} + \frac{y_{24}}{A_4} \right) (w_7 + w_8 + w_9 + w_{10} + w_{11} + w_{12} + w_{14} + w_{15} + w_{16}), \\
\sigma_{bd5} &= \left( \frac{y_{27} U(x)}{2I_5} + \frac{y_{30}}{A_5} \right) (w_6 + w_7 + w_8 + w_9 + w_{10} + w_{11} + w_{12} + w_{13} + w_{14} + w_{15} + w_{16}), \\
\sigma_{bd6} &= \left( \frac{y_{33} U(x)}{2I_6} + \frac{y_{36}}{A_6} \right) (w_5 + w_6 + w_7 + w_8 + w_9), \\
\sigma_{bd7} &= \left( \frac{y_{39} U(x)}{2I_7} + \frac{y_{42}}{A_7} \right) (w_4 + w_5 + w_6 + w_7 + w_8 + w_9), \\
\sigma_{bd8} &= \left( \frac{y_{45} U(x)}{2I_8} + \frac{y_{48}}{A_8} \right) (w_3 + w_4 + w_5 + w_6 + w_7 + w_8 + w_9), \\
\sigma_{bd9} &= \left( \frac{y_{51} U(x)}{2I_9} + \frac{y_{54}}{A_9} \right) (w_2 + w_3 + w_4 + w_5 + w_6 + w_7 + w_8 + w_9), \\
\sigma_{bd10} &= \left( \frac{y_{57} U(x)}{2I_{10}} + \frac{y_{60}}{A_{10}} \right), \quad \sigma_{bd11} = \left( \frac{y_{63} U(x)}{2I_{11}} + \frac{y_{66}}{A_{10}} \right), \\
\sigma_{bdk1} &= \left( \frac{y_{69} U(x)}{2I_{11}} + \frac{y_{72}}{A_{11}} \right), \quad \sigma_{bdk2} = \left( \frac{y_{75} U(x)}{2I_{11}} + \frac{y_{78}}{A_{11}} \right), \quad \sigma_{bdk3} = \left( \frac{y_{81} U(x)}{2I_{11}} + \frac{y_{84}}{A_{11}} \right), \\
\sigma_{bdk4} &= \left( \frac{y_{87} U(x)}{2I_{11}} + \frac{y_{90}}{A_{11}} \right), \quad \sigma_{bdk5} = \left( \frac{y_{93} U(x)}{2I_{11}} + \frac{y_{96}}{A_{11}} \right) .
\end{aligned} \tag{5.58}$$

Definiujemy wyrażenia

$$\begin{aligned}\sup_d &= \max(\sigma_{bd10}, \sigma_{bd11} + \max(\sigma_{bdk1}, \sigma_{bdk2}, \sigma_{bdk3}, \sigma_{bdk4}, \sigma_{bdk5})), \\ \inf_d &= \min(\sigma_{bd10}, \sigma_{bd11} + \min(\sigma_{bdk1}, \sigma_{bdk2}, \sigma_{bdk3}, \sigma_{bdk4}, \sigma_{bdk5})).\end{aligned}\tag{5.59}$$

Naprężenia w dolnych włóknach w kolejnych stanach obciążenia są następujące:

$$\begin{aligned}\sigma_{d1} &= \sigma_{bd1}, \\ \sigma_{d2} &= \sigma_{bd1} + \sigma_{bd2}, \\ \sigma_{d3} &= \sigma_{bd1} + \sigma_{bd2} + \sigma_{bd3}, \\ \sigma_{d4} &= \sigma_{bd1} + \sigma_{bd2} + \sigma_{bd3} + \sigma_{bd4}, \\ \sigma_{d5} &= \sigma_{bd1} + \sigma_{bd2} + \sigma_{bd3} + \sigma_{bd4} + \sigma_{bd5}, \\ \sigma_{d6} &= \sigma_{bd1} + \sigma_{bd2} + \sigma_{bd3} + \sigma_{bd4} + \sigma_{bd5} + \sigma_{bd6}, \\ \sigma_{d7} &= \sigma_{bd1} + \sigma_{bd2} + \sigma_{bd3} + \sigma_{bd4} + \sigma_{bd5} + \sigma_{bd6} + \sigma_{bd7}, \\ \sigma_{d8} &= \sigma_{bd1} + \sigma_{bd2} + \sigma_{bd3} + \sigma_{bd4} + \sigma_{bd5} + \sigma_{bd6} + \sigma_{bd7} + \sigma_{bd8}, \\ \sigma_{d9} &= \sigma_{bd1} + \sigma_{bd2} + \sigma_{bd3} + \sigma_{bd4} + \sigma_{bd5} + \sigma_{bd6} + \sigma_{bd7} + \sigma_{bd8} + \sigma_{bd9}, \\ \sigma_{d10} &= \sigma_{bd1} + \sigma_{bd2} + \sigma_{bd3} + \sigma_{bd4} + \sigma_{bd5} + \sigma_{bd6} + \sigma_{bd7} + \sigma_{bd8} + \sigma_{bd9} + \sigma_{bd10}, \\ \sigma_{d11} &= \sigma_{bd1} + \sigma_{bd2} + \sigma_{bd3} + \sigma_{bd4} + \sigma_{bd5} + \sigma_{bd6} + \sigma_{bd7} + \sigma_{bd8} + \sigma_{bd9} + \sigma_{bd11}.\end{aligned}\tag{5.60}$$

Ekstremalne wartości naprężeń ustalone zostaną z wykorzystaniem funkcji max, min.

$$\begin{aligned}\sigma_{g \max} &= \max\{\sigma_{g1}, \sigma_{g2}, \sigma_{g3}, \sigma_{g4}, \sigma_{g5}, \sigma_{g6}, \sigma_{g7}, \sigma_{g8}, \sigma_{g9}, \sigma_{g9} + \sup_g\}, \\ \sigma_{d \max} &= \max\{\sigma_{d1}, \sigma_{d2}, \sigma_{d3}, \sigma_{d4}, \sigma_{d5}, \sigma_{d6}, \sigma_{d7}, \sigma_{d8}, \sigma_{d9}, \sigma_{d9} + \sup_d\}, \\ \sigma_{g \min} &= \min\{\sigma_{g1}, \sigma_{g2}, \sigma_{g3}, \sigma_{g4}, \sigma_{g5}, \sigma_{g6}, \sigma_{g7}, \sigma_{g8}, \sigma_{g9}, \sigma_{g9} + \inf_g\}, \\ \sigma_{d \min} &= \min\{\sigma_{d1}, \sigma_{d2}, \sigma_{d3}, \sigma_{d4}, \sigma_{d5}, \sigma_{d6}, \sigma_{d7}, \sigma_{d8}, \sigma_{d9}, \sigma_{d9} + \inf_d\}.\end{aligned}\tag{5.61}$$

Kolejne ograniczenia, które uwzględnione są w tej pracy to SGU. Przemieszczenia w kolejnych stanach obciążenia i dla przyjętych przedziałów charakterystycznych otrzymamy z zależności:

Dla pierwszego przedziału charakterystycznego:

$$\begin{aligned}
u_{g1} &= y_1 \frac{\sqrt{R_1^2 - x^2}}{R_1} - y_5 \frac{x}{R_1}, & u_{g2} &= y_7 \frac{\sqrt{R_1^2 - x^2}}{R_1} - y_{11} \frac{x}{R_1}, \\
u_{g3} &= y_{13} \frac{\sqrt{R_1^2 - x^2}}{R_1} - y_{17} \frac{x}{R_1}, & u_{g4} &= y_{19} \frac{\sqrt{R_1^2 - x^2}}{R_1} - y_{23} \frac{x}{R_1}, \\
u_{g5} &= y_{25} \frac{\sqrt{R_1^2 - x^2}}{R_1} - y_{29} \frac{x}{R_1}, & u_{g6} &= y_{31} \frac{\sqrt{R_1^2 - x^2}}{R_1} - y_{35} \frac{x}{R_1}, \\
u_{g7} &= y_{37} \frac{\sqrt{R_1^2 - x^2}}{R_1} - y_{41} \frac{x}{R_1}, & u_{g8} &= y_{43} \frac{\sqrt{R_1^2 - x^2}}{R_1} - y_{47} \frac{x}{R_1}, \\
u_{g9} &= y_{49} \frac{\sqrt{R_1^2 - x^2}}{R_1} - y_{53} \frac{x}{R_1}, & u_{g10} &= y_{55} \frac{\sqrt{R_1^2 - x^2}}{R_1} - y_{59} \frac{x}{R_1}, \\
u_{g11} &= y_{61} \frac{\sqrt{R_1^2 - x^2}}{R_1} - y_{65} \frac{x}{R_1}, & u_{gk1} &= y_{67} \frac{\sqrt{R_1^2 - x^2}}{R_1} - y_{71} \frac{x}{R_1}, \\
u_{gk2} &= y_{73} \frac{\sqrt{R_1^2 - x^2}}{R_1} - y_{77} \frac{x}{R_1}, & u_{gk3} &= y_{79} \frac{\sqrt{R_1^2 - x^2}}{R_1} - y_{83} \frac{x}{R_1}, \\
u_{gk4} &= y_{85} \frac{\sqrt{R_1^2 - x^2}}{R_1} - y_{89} \frac{x}{R_1}, & u_{gk5} &= y_{91} \frac{\sqrt{R_1^2 - x^2}}{R_1} - y_{95} \frac{x}{R_1}.
\end{aligned} \tag{5.62}$$

Ugięcia sumaryczne wyznaczono z:

$$\begin{aligned}
u_{gm} &= |u_{g1} + u_{g2} + u_{g3} + u_{g4} + u_{g5} + u_{g6} + u_{g7} + u_{g8} + u_{g9} + u_{g10}|, \\
u_{gk} &= \max(u_{gk1}, u_{gk2}, u_{gk3}, u_{gk4}, u_{gk5}).
\end{aligned} \tag{5.63}$$

Uwzględniając wyrażenia (5.55-5.63) możemy ostatecznie warunki ograniczające zapisać w znanej postaci  $g_i \geq 0$  [52]:

$$\begin{aligned}
g_1 &= u_{gr1} - \alpha_1 u_{gm} \geq 0, \\
g_2 &= \alpha_2 u_{gr1} - \alpha_1 u_{g11} \geq 0, \\
g_3 &= u_{gr1} - \alpha_1 u_{gk} \geq 0, \\
g_4 &= f_{cd} + \sigma_{g \min} \geq 0, \\
g_5 &= f_{cd} + \sigma_{d \min} \geq 0 \\
\alpha_1 &= 0.8, \quad \alpha_2 = 0.66.
\end{aligned} \tag{5.64}$$

Ograniczenia  $g_1, g_2, g_3$  nie zależą jawnie od sterowania i mogą być aktywne tylko punktowo, ograniczenia zaś  $g_4, g_5$  zależą jawnie od sterowania  $U(x)$  i są aktywne w pewnym przedziale. Nierówność  $g_1$  ogranicza przemieszczenie pionowe łuku po zakończeniu jego montażu, nierówność  $g_2$  ogranicza przemieszczenie pionowe od obciążeń stałych w



fazie eksploatacji, a nierówność  $g_3$  przemieszczenie pionowe łuku od obciążeń zmiennych odpowiadających pięciu rozważanym stanom eksploatacji. Warto zauważyć, że wykorzystując propozycję opisaną w pracy [14] sformułowano ograniczenia z użyciem funkcji min, max. Pozwala to na znaczące zmniejszenie ich liczby, wadą jest to, że w przypadku aktywności ograniczenia nie wiadomo, w którym stanie obciążenia naprężenie (ugięcie) osiągnęło wartość graniczną.

## 5.10 Sformułowanie zadania optymalizacji wiaduktu

Wyznaczyć należy taki rozkład zmiennej decyzyjnej (sterowanie)  $U(x)$ , którą jest wysokość przekroju poprzecznego wzdłuż osi łuku, która minimalizuje przyjętą funkcję celu (objętość), przy spełnieniu ograniczeń wynikających z norm, przepisów i praktyki projektowej. Formalny zapis jest zatem następujący:

$$\begin{aligned} & \min_{U(x)} y_{97}(L), \\ & y'_{97} = \frac{A(x) \cdot R_1}{\sqrt{(R_1^2 - (x - x_1)^2)}} \quad x \in [0, 30], \\ & y'_{97} = \frac{A(x) \cdot R_2}{\sqrt{(R_2^2 - (x - x_2)^2)}} \quad x \in [30, 55.9], \\ & y_{97}(0) = 0, \end{aligned} \tag{5.65}$$

z warunkami pobocznymi, którymi są:

1. Równania stanu (5.17-5.44) z warunkami brzegowymi (5.51), wewnętrznymi warunkami punktowymi (5.52) i warunkami implicit (5.53)

$$y'_i = f_i(y, U, x) \quad i = 1 \div 97. \tag{5.66}$$

2. Warunki ograniczające  $g_s \geq 0$  (5.54, 5.64) określające zbiór sterowań dopuszczalnych

$$g_s(y, U, x) \geq 0 \quad s = 1 \div 5. \tag{5.67}$$

Zadanie optymalnego kształtowania przekroju poprzecznego wiaduktu ma strukturę formalną umożliwiającą bezpośrednie zastosowanie zasady minimum (3.6). Funkcja Hamiltona zgodnie z (3.4) ma obecnie postać:

$$H = \sum_{i=1}^{97} \lambda_i \cdot f_i + \sum_{s=1}^5 \mu_s \cdot g_s. \tag{5.68}$$

Układ równań sprzężonych (3.9) jest następujący:

$$\lambda'_i = - \sum_{k=1}^{97} \lambda_k \cdot \frac{\partial f_k}{\partial y_i} - \sum_{s=1}^5 \mu_s \cdot \frac{\partial g_s}{\partial y_i} \quad i = 1 \div 97. \quad (5.69)$$

Z warunku (3.9), wyznaczmy sterowanie  $U(x)$  lub mnożniki  $\mu_s$

$$0 = \sum_{k=1}^{97} \lambda_k \cdot \frac{\partial f_k}{\partial U} + \sum_{s=1}^5 \mu_s \cdot \frac{\partial g_s}{\partial U}. \quad (5.70)$$

Optymalne rozwiązanie można wyznaczyć z różniczkowo-algebraicznego układu równań (5.66, 5.69÷5.70).

Jeśli jedno z ograniczeń (5.67) jest aktywne

$$g_m(y, U, x) = 0, \quad (5.71)$$

to warunek (5.71) pozwala wyznaczyć sterowanie  $U(x)$ , natomiast z równania (5.70) określony zostanie mnożnik  $\mu_m$ , przy zmodyfikowanych równaniach sprzężonych (5.69). Rozwiązanie problemu jest możliwe wtedy, gdy aktywne jest jednocześnie jedno ograniczenie, możliwy jest także przypadek w którym ograniczenie  $g_m = 0$  obowiązuje w całym przedziale.

### 5.10.1 Rozwiązanie optymalne - wyniki obliczeń

Zastosowanie zasady minimum umożliwia sprowadzenie zadania optymalizacji do wielopunktowego problemu brzegowego, który został rozwiązany za pomocą programu `dircol-2.1`. W zadaniu optymalizacji wyznaczono:

- 97 zmiennych stanu  $y_i$ ,
- 97 zmiennych sprzężonych  $\lambda_i$ ,
- 1 zmienną decyzyjną  $U(x)$ ,
- 5 mnożników  $\mu$ ,
- 48 stałe, które są skokami zmiennych stanu na podporze pośredniej,
- 48 stałe, opisujące nieciągłości zmiennych sprzężonych na podporze pośredniej,
- 64 stałe, które są nieciągłościami zmiennych sprzężonych w punkcie aktywności ograniczeń  $g_i = 0$ ,  $i = 1, 2, 3$ . Łącznie do wyznaczenia pozostaje 360 wielkości. Uzyskane rozwiązanie optymalne spełnia warunki konieczne optymalności. Struktura sterowania, dla której zadanie

optymalizacji jest zbieżne ma postać (Początek eksploatacji wiaduktu  $t = t_0$ ):

$$U(x) = \begin{cases} U_1 & \text{gdy } x \in [0, 0 \div 5, 7867], \quad g_1 = 0, x_b = 3, 2011, \\ U_{g_5} & \text{gdy } g_5 = 0, \quad x \in [5, 7867 \div 10, 8870], \\ U_1 & \text{gdy } x \in [10, 8870 \div 13, 3833], \quad g_3 = 0, x_b = 13, 3833, \\ U_{g_4} & \text{gdy } g_4 = 0, \quad x \in [13, 3833 \div 17, 0354], \\ U_1 & \text{gdy } x \in [17, 0354 \div 19, 3959], \\ U_{g_5} & \text{gdy } g_5 = 0, \quad x \in [19, 3959 \div 27, 0591], \\ U_{opt} & \text{gdy } H_U = 0, \quad x \in [27, 0591 \div 30, 0], \\ U_{g_4} & \text{gdy } g_4 = 0, \quad x \in [30, 0 \div 31, 0611], \\ U_1 & \text{gdy } x \in [31, 0611 \div 42, 8454], \\ U_{g_4} & \text{gdy } g_4 = 0, \quad x \in [42.8454 \div 47.4280], \\ U_1 & \text{gdy } x \in [47, 4280 \div 55, 9]. \end{cases} \quad (5.72)$$

Odpowiadająca tej strukturze sterowania funkcja celu ma wartość  $y_{97} = 257.5681$ .

W punktach  $x = x_{bi}$  ograniczenia  $g_1 = 0, g_3 = 0$  są aktywne, nie zmienia się w tym punkcie wartość sterowania, ponieważ ograniczenia te nie zależą jawnie od sterowania, skoku natomiast doznają w tym punkcie mnożniki Lagrang'a. Ograniczenia  $g_4 = 0, g_5 = 0$  są aktywne trzy i dwukrotnie w przedziałach, postać sterowania wynika wtedy wprost z tych ograniczeń, niezerowe pozostają w tych przedziałach odpowiadające im mnożniki  $\mu_4, \mu_5$ .

$$\lambda_k(x_b^+) = \lambda_k(x_b^-) + D_k,$$

$$k = 1, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31, 35, 37, 41, 43, 47, 49, 53, 55, 59, 85, 89,$$

$$\mu_4 \neq 0, \quad \text{gdy } x \in [13, 3833 \div 17, 0354], x \in [30, 0 \div 31, 0611], x \in [42, 8454 \div 47, 4280],$$

$$\mu_5 \neq 0, \quad \text{gdy } x \in [5.7867 \div 10, 8870], x \in [19, 3959 \div 27.0591].$$

(5.73)

Pełne rozwiązanie numeryczne zadania optymalizacji ze strukturą sterowania określoną przez (5.72) przedstawiono na rysunkach (Rys.5.26÷ Rys.5.49), zestawiając obok siebie z jednej strony zmienne stanu  $y_i$ , z drugiej zaś zmienne sprzężone  $\lambda_i$ , ponadto zamieszczono rozkłady ograniczeń z ich obszarami aktywności oraz zmienną decyzyjną  $U(x)$ . Zamieszczone wykresy pozwalają prześledzić rozwiązania optymalne szczegółowo. Potwierdzenie znajdują związki dotyczące podpory pośredniej, dla której formułowane są zgodnie z (5.52) warunki punktowe.

Związek ten jest zapisany następująco:

$$y_k(L_1) = 0 \implies \lambda_k(L_1^+) = \lambda_k(L_1^-) + B_k,$$

$$k = 1, 2, 5, 7, 8, 11, 13, 14, 17, 19, 20, 23, 25, 26, 29, 31, 32, 35, 37, 38, 41, 43, 44, 47, 49, 50, 53, 55, 56, 59, 61, 62, 65, 67, 68, 71, 73, 74, 77, 79, 80, 83, 85, 86, 89, 91, 92, 95.$$
(5.74)

Kolejną własność, która może być wyeksponowana jest związana z nieciągłością zmiennej stanu na podporze pośredniej:

$$y_k(L_1^+) = y_k(L_1^-) + A_k \implies \lambda_k(L_1) = 0.$$

$$k = 3, 4, 6, 9, 10, 12, 15, 16, 18, 21, 22, 24, 27, 28, 30, 33, 34, 36, 39, 40, 42, 45, 46, 48, 51, 52, 54, 57, 58, 60, 63, 64, 66, 69, 70, 72, 75, 76, 78, 81, 82, 84, 87, 88, 90, 93, 94, 96.$$
(5.75)

Zamieszczone w pracy rysunki (Rys.5.26÷ Rys.5.49) są zestawione w taki sposób, aby na jednej stronie pokazane zostały wykresy sił przekrojowych i odpowiadające im zmienne sprzężone odpowiadające jednemu etapowi obciążenia.

Struktura sterowania (5.72) zależy istotnie od przyjętego czasu eksploatacji, jeśli założyć, że ten czas  $t > 1800$  dni, to wtedy struktura rozwiązania optymalnego jest następująca:

$$U(x) = \begin{cases} U_1 & \text{gdy } x \in [0, 0 \div 1, 9033], \\ U_{opt} & \text{gdy } H_U = 0, \quad x \in [1, 9033 \div 5, 7867], \quad g_2 = 0, x_{b1} = 3, 2011, g_1 = 0, x_{b2} = 4, 4959, \\ U_1 & \text{gdy } x \in [5, 7867 \div 13, 3833], \quad g_3 = 0, x_{b3} = 13, 3833, \\ U_{opt} & \text{gdy } H_U = 0, \quad x \in [13, 3833 \div 15, 8318], \\ U_1 & \text{gdy } x \in [15, 8318 \div 19, 3959], \\ U_{g_5} & \text{gdy } g_5 = 0, \quad x \in [19, 3959 \div 22, 8042], \\ U_{opt} & \text{gdy } H_U = 0, \quad x \in [22, 8042 \div 31, 0611], \\ U_1 & \text{gdy } x \in [31, 0611 \div 33, 6179], \\ U_2 & \text{gdy } x \in [33, 6179 \div 35, 8761], \\ U_{opt} & \text{gdy } H_U = 0, \quad x \in [35, 8761 \div 37, 1421], \\ U_2 & \text{gdy } x \in [37, 1421 \div 39, 8911], \quad g_1 = 0, x_b = 37, 1421, \\ U_{opt} & \text{gdy } H_U = 0, \quad x \in [39, 8911 \div 42, 8454], \\ U_1 & \text{gdy } x \in [42, 8454 \div 55, 90], \quad g_1 = 0, x_b = 50, 4231. \end{cases}$$
(5.76)

z funkcją celu, która ma wartość  $y_{97} = 276, 8625$ . W tej strukturze aktywne są ograniczenia  $g_1 = 0, g_2 = 0, g_3 = 0$  oraz ograniczenie  $g_5 = 0$ .

### 5.10.2 Rozwiązanie praktyczne odcinkowo stałe

Obliczenia przeprowadzono w odniesieniu do dwóch stanów obiektu. W stanie pierwszym odpowiadającym początkowi okresu eksploatacji, uwzględniono zjawiska reologiczne odpowiednio do rozważanego wieku betonu. Stan drugi odpowiada okresowi eksploatacji powyżej 1800 dni, po którym, zgodnie z normą intensywność zjawisk reologicznych jest pomijalnie mała. Zadania optymalizacji, opisujące oba te stany, zostały rozwiązane niezależnie. Wyznaczono więc dwa różne rozwiązania optymalne (5.72,5.76) dotyczące tego samego obiektu. Wyznaczenie jednego rozwiązania, przy którym spełnione byłyby stany graniczne nośności i użyteczności wymagałoby sformułowania i rozwiązania zadania optymalizacji obejmującego obydwie ww. stany. Jednak rozwiązanie zadania o takim wymiarze (dwukrotnie większym od wymiaru zadania rozwiązanego w niniejszej pracy), ze względów ograniczeń w programie, w chwili obecnej nie jest na razie możliwe.

W pracy [15] zaproponowano metodę pozwalającą przyjąć rozwiązanie odcinkowo stałe na podstawie rozwiązania teoretycznego w przypadku optymalizacji przekroju poprzecznego stalowych dźwigarów blachownicowych. Ta metoda może znaleźć również zastosowanie w wyznaczeniu przekroju poprzecznego łuku żelbetowego, możliwego do realizacji w praktyce, który jednocześnie zapewnia spełnienie stanów granicznych nośności i użyteczności w każdym okresie montażu i eksploatacji obiektu. Zaproponowane rozwiązanie praktyczne o strukturze (5.77) jest przedstawione na rysunku (Rys.5.56). Jest to rozwiązanie odcinkowo stałe, bazujące na rozwiązaniach teoretycznych, które zostało wyznaczone w kilku próbach iteracyjnych.

Zastosowano następujący schemat postępowania:

1. Program sprawdzający zbudowano na bazie programu wykorzystywanego przy wyznaczeniu przekroju optymalnego, w którym w miejsce zmiennej decyzyjnej (wysokości przekroju poprzecznego) wstawiono proponowaną wielkość odcinkowo-stałą. W programie sprawdzającym wprowadzono inną zmienną decyzyjną, którą w optymalizowanym obiekcie jest stały wymiar przekroju. W tym przypadku jest to szerokość łuków żelbetowych. W odniesieniu do tej zmiennej zdefiniowano dopuszczalny przedział zmienności, którego dolną granicą jest wymagany wymiar.
2. W pierwszej próbie przyjmuje się rozwiązanie odcinkowo stałe, które jest obwiednią obu rozwiązań optymalnych.
3. Za pomocą programu sprawdzającego wyznacza się optymalny przebieg nowej zmiennej decyzyjnej.
4. Jeśli zmienna decyzyjna przyjmuje wartość minimalną i jednocześnie są spełnione ograniczenia wynikające ze stanów granicznych nośności i użytkowania to obliczenia można uznać za zakończone. Jeśli natomiast na pewnym odcinku zmienna decyzyjna

jest większa to koryguje się proponowane rozwiązanie odcinkowo stałe i powtarza się obliczenia sprawdzające.

Wyznaczenie rozwiązania odcinkowo-stałego tą metodą jest trudne i nie zawsze możliwe. W prezentowanym przykładzie udało się wyznaczyć, głównie dzięki temu, że obydwa rozwiązania teoretyczne (optymalne) mają podobny charakter.

Analizując przedstawione na rysunku (Rys.5.56) rozwiązanie należy zwrócić uwagę na fakt, że w okolicy osi symetrii obiektu, gdzie obydwa rozwiązania teoretyczne przyjmują wartość minimalną, rozwiązanie praktyczne na pewnym odcinku przyjmuje wartość maksymalną. W programach numerycznych zasadniczych oraz w programie sprawdzającym wprowadzono ograniczenie dopuszczalnej deformacji osi łuku w stanach montażowych. To ograniczenie ma istotny wpływ na wynik obliczeń i w obu zadaniach optymalizacji było aktywne. W praktycznej realizacji przekroju odcinkowo-stałego stosunkowo wiotki łuk prefabrykowany w stanach montażowych ulega większej, niż w rozwiązaniu teoretycznym, deformacji (większe przemieszczenia ku górze zwłaszcza w osi symetrii) ze względu na zwiększony ciężar układanej mieszanki betonowej w kolejnych etapach betonowania. Zwiększona wysokość przekroju poprzecznego łuków w okolicy osi symetrii wynika z konieczności skorygowania tych deformacji w ostatnich stanach montażowych. Efekt zwiększonej wysokości przekroju poprzecznego w okolicy osi symetrii uzyskiwano również w obliczeniach teoretycznych, w których formułowano ostrzejsze ograniczenie deformacji łuków. Obliczenia sprawdzające, w odniesieniu do proponowanej, odcinkowo-stałej wysokości przekroju, przeprowadzono w każdej sytuacji obliczeniowej, jaka może wystąpić w okresie budowy i eksploatacji.

Struktura sterowania, która spełnia warunki w stanie początkowym eksploatacji i jednocześnie w stanie eksploatacji po  $t > 1800$  dni, a ponadto jest odcinkowo stała ma poniżej podaną postać:

$$U(x) = \begin{cases} 0,90 & \text{gdy } x \in [0, 0 \div 4,4959], \\ 0,60 & \text{gdy } x \in [4,4959 \div 19,3959], \\ 0,70 & \text{gdy } x \in [19,3959 \div 28,0647], \\ 0,80 & \text{gdy } x \in [28,0647 \div 29,0453], \\ 0,90 & \text{gdy } x \in [29,0453 \div 31,7913], \\ 0,50 & \text{gdy } x \in [31,7913 \div 33,6179], \\ 0,90 & \text{gdy } x \in [33,6179 \div 39,8911], \\ 0,60 & \text{gdy } x \in [39,8911 \div 47,4280], \\ 0,50 & \text{gdy } x \in [47,4280 \div 55,9]. \end{cases} \quad (5.77)$$

Związana z tą strukturą funkcja celu ma wartość  $y_{97} = 330,8045$ .

W tabeli zestawiono wartości funkcji celu w różnych sytuacjach obliczeniowych:

Tab. 5.2 Wartości funkcji celu w różnych sytuacjach obliczeniowych

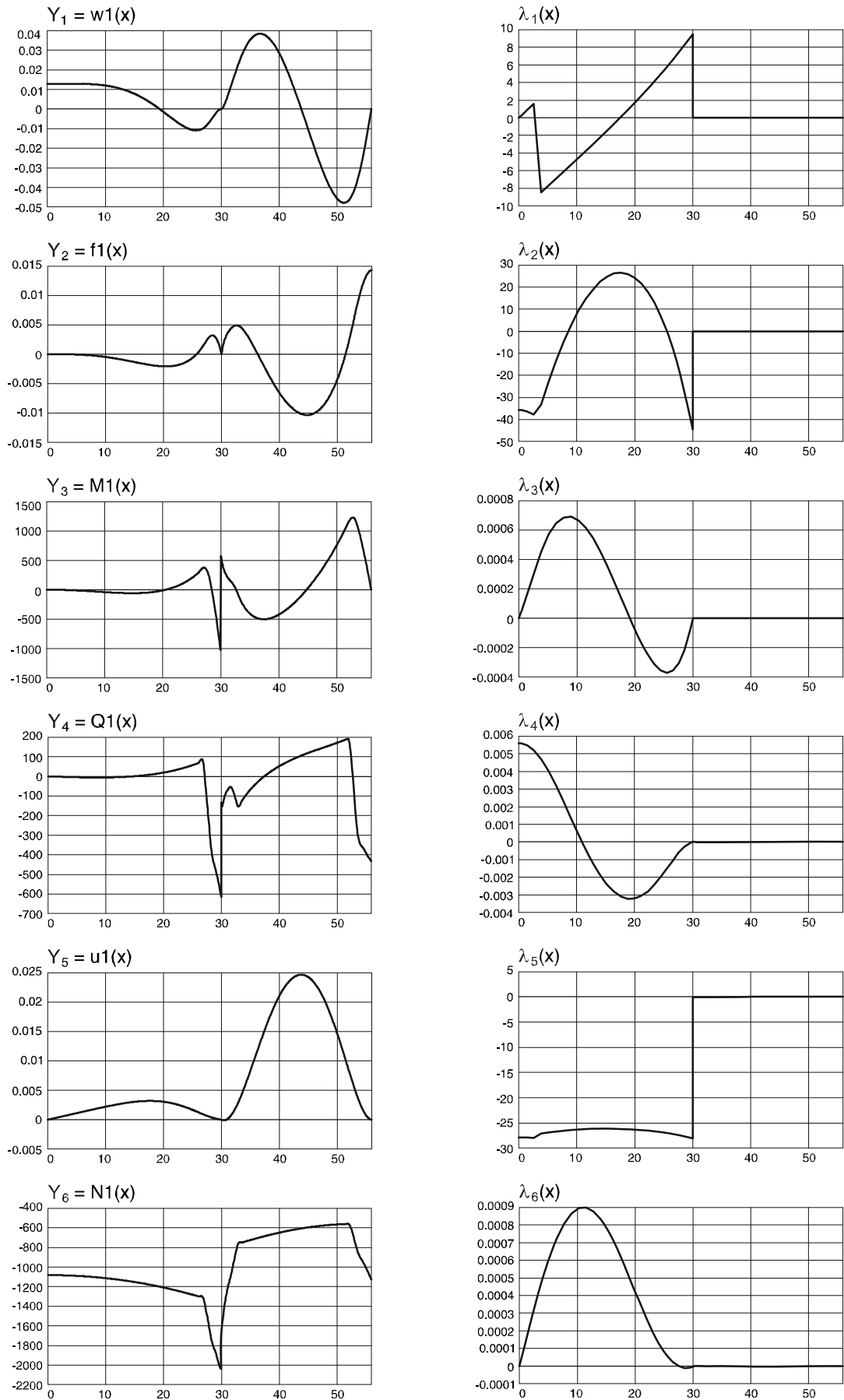
Optymalizacja	Wartość funkcji celu $y_{97}$	Wzrost wartości $y_{97}$
Początkowy stan eksploatacji	257,5681 $m^3$	1,0
Stan eksploatacji w czasie $t > 1800$ dni	276,8625 $m^3$	1,075
Rozwiązanie odcinkowo-stałe	330,8045 $m^3$	1,284

### 5.10.3 Wymiarowanie zbrojenia

W obliczeniach przyjęto siedem ograniczeń, z których dwa ostatnie to ograniczenia naprężeń rozciągających w górnych i dolnych włóknach przekroju żelbetowego. Te ograniczenia zostały tak sformułowane aby nigdy nie były aktywne. Zostały wprowadzone wyłącznie w celu wyznaczenia hipotetycznych naprężeń rozciągających w przekroju traktowanym jako jednorodny. Naprężenia rozciągające w elementach żelbetowych przenosi stal zbrojeniowa. W wymiarowaniu zbrojenia wykorzystuje się obwiednie sił przekrojowych. W przypadku, gdy w poszczególnych stanach pracy zmieniają się charakterystyki geometryczne przekroju, dodawanie sił przekrojowych nie jest dopuszczalne i dlatego w prezentowanych modelach sumuje się wyłącznie naprężenia. Zastosowanie w formułowanych ograniczeniach funkcji maksimum lub minimum sprowadza się do działania na obwiedniach naprężeń rozciągających lub ściskających.

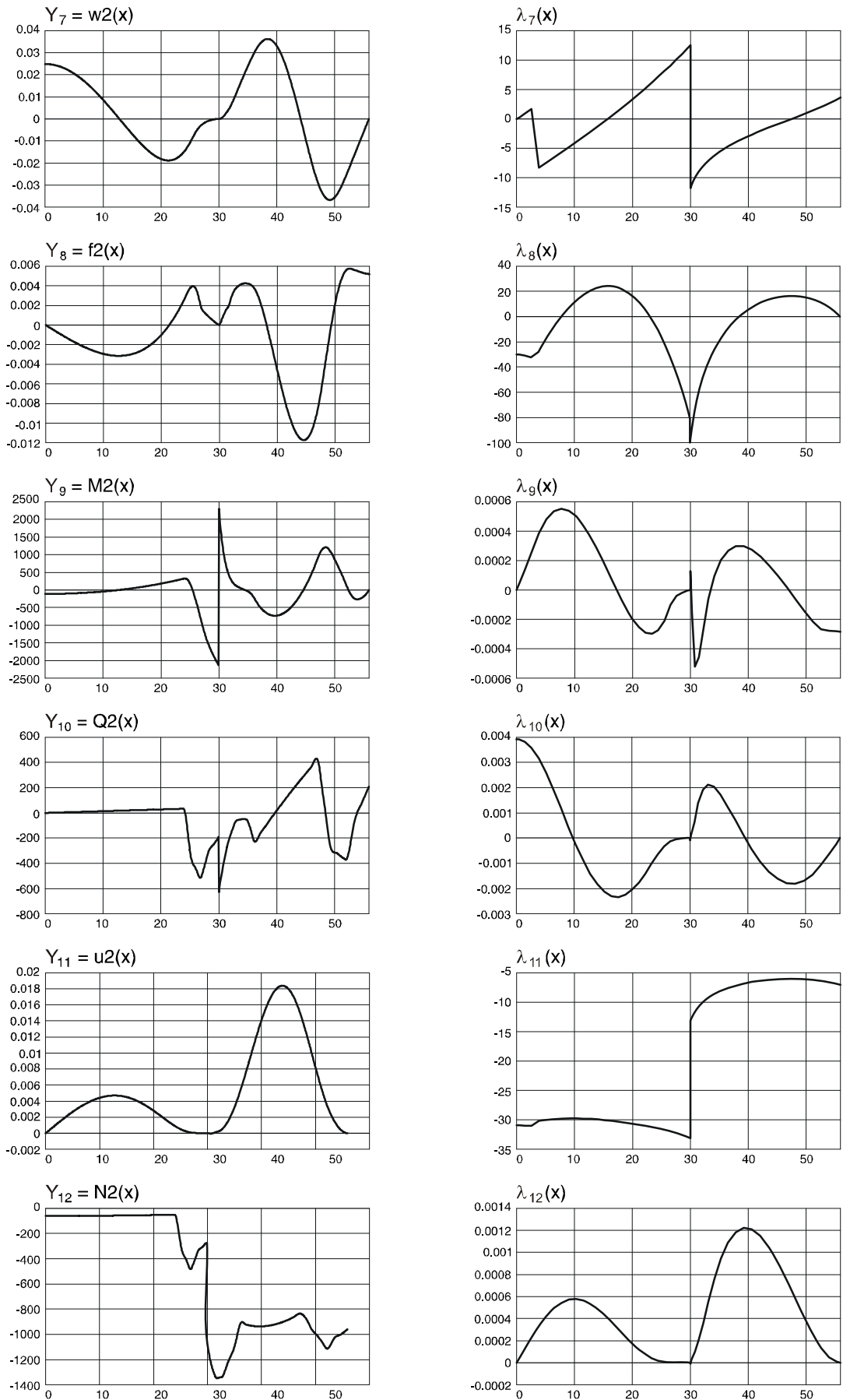
Na rysunkach Rys.5.57 i Rys.5.58 przedstawiono wykresy maksymalnych hipotetycznych naprężeń rozciągających na górnej i dolnej powierzchni łuku żelbetowego o przekroju traktowanym jako jednorodny. Na ich podstawie można wyznaczyć wartości hipotetycznych sił przekrojowych (siły osiowej i momentu zginającego), które mogłyby wywołać ten sam efekt. Wartości tych sił, użyte w normowych algorytmach, pozwalają zaprojektować odpowiednie zbrojenie.

W przedstawionym w pracy modelu matematycznym, przy wyznaczaniu charakterystyk geometrycznych przekroju nie uwzględniono zbrojenia. Wyznaczone na podstawie tych obliczeń zbrojenie należy uwzględnić w wyrażeniach opisujących charakterystyki geometryczne przekroju poprzecznego a następnie obliczenia należy powtórzyć. Zwymiarowane na podstawie wyników uzyskanych w kolejnej iteracji zbrojenie nie powinno różnić się od poprzedniego.

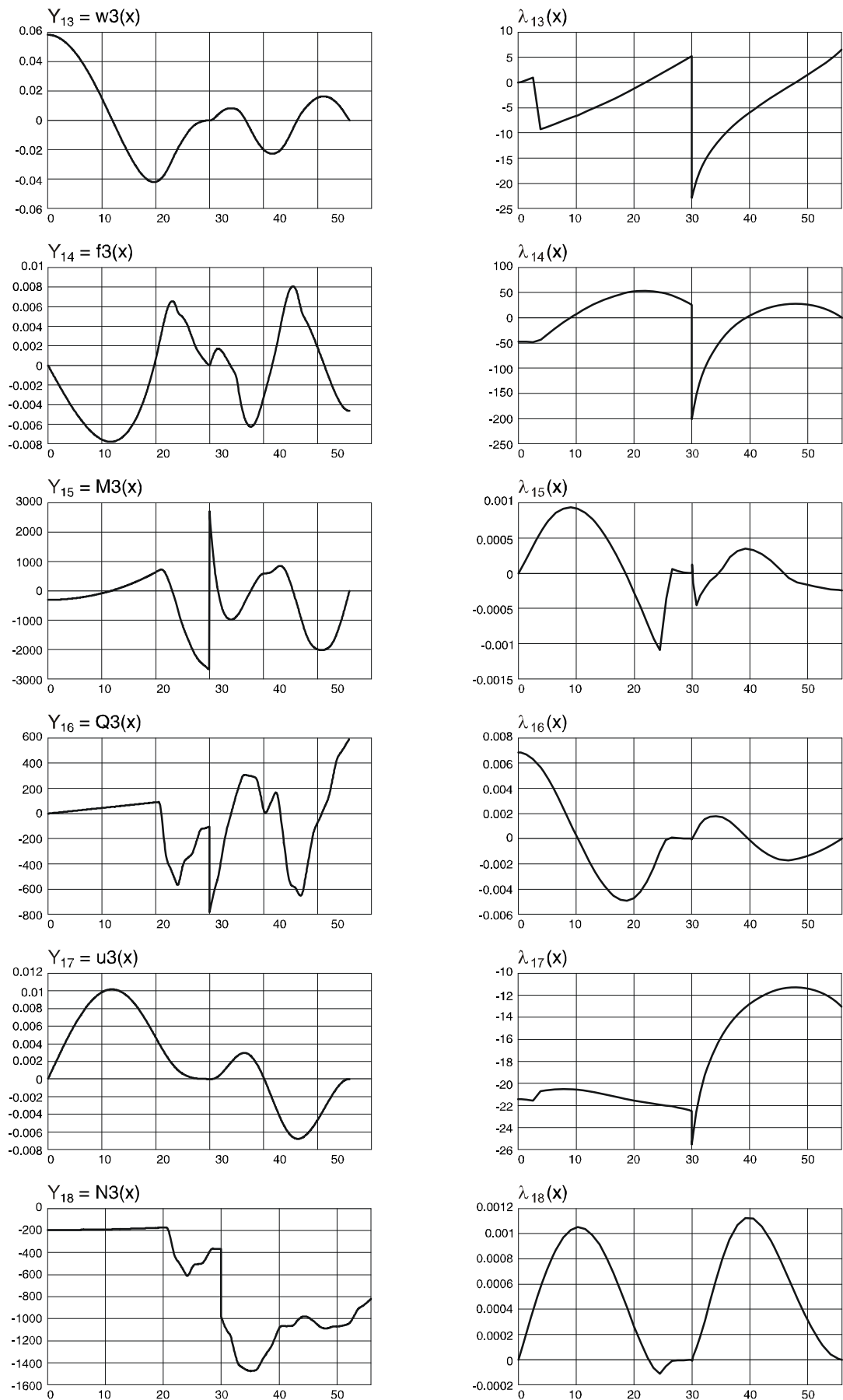


Rys. 5.26. Zmienne stanu i zmienne sprzężone w fazie montażowej I

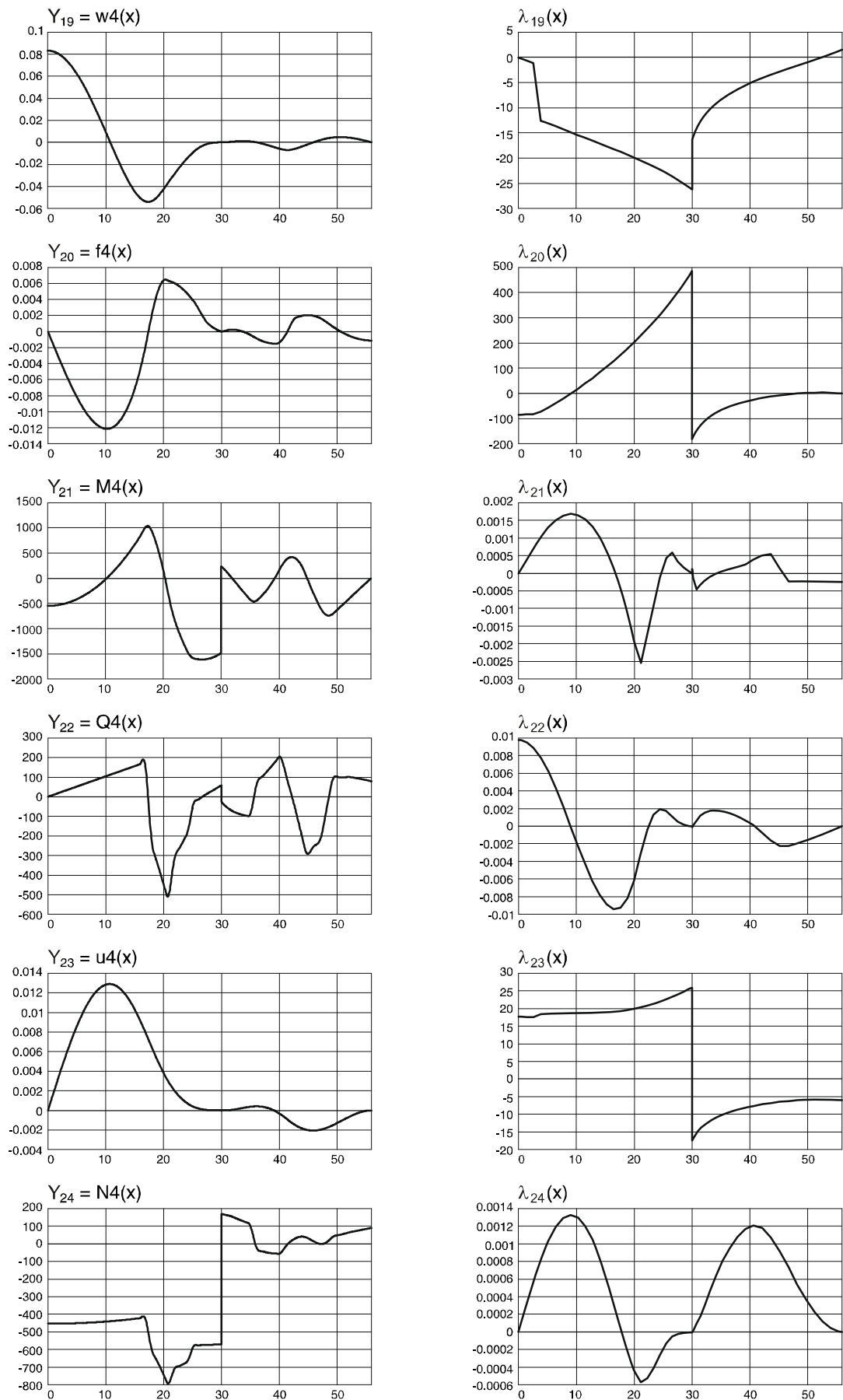




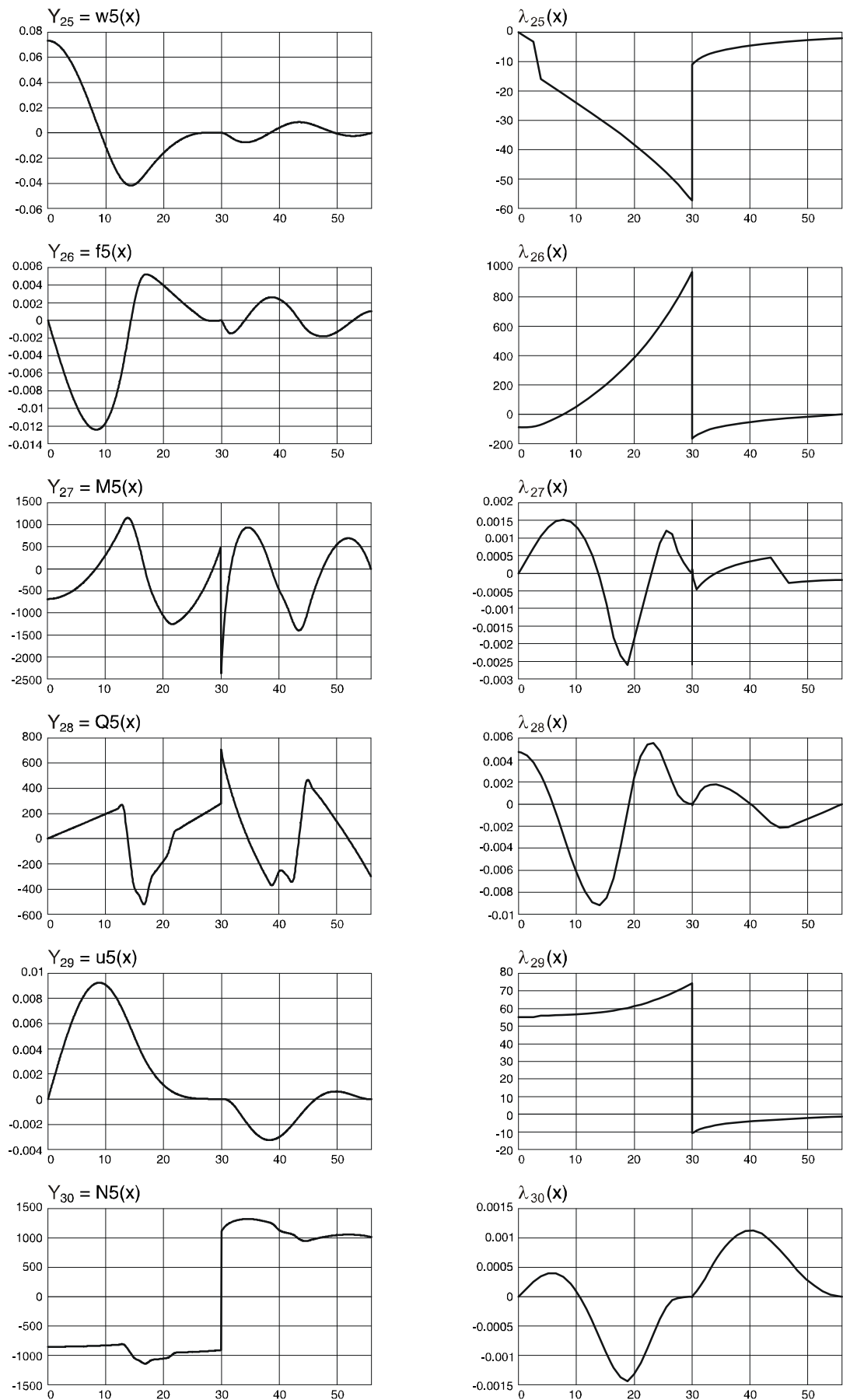
Rys. 5.27. Zmienne stanu i zmienne sprzężone w fazie montażowej 2



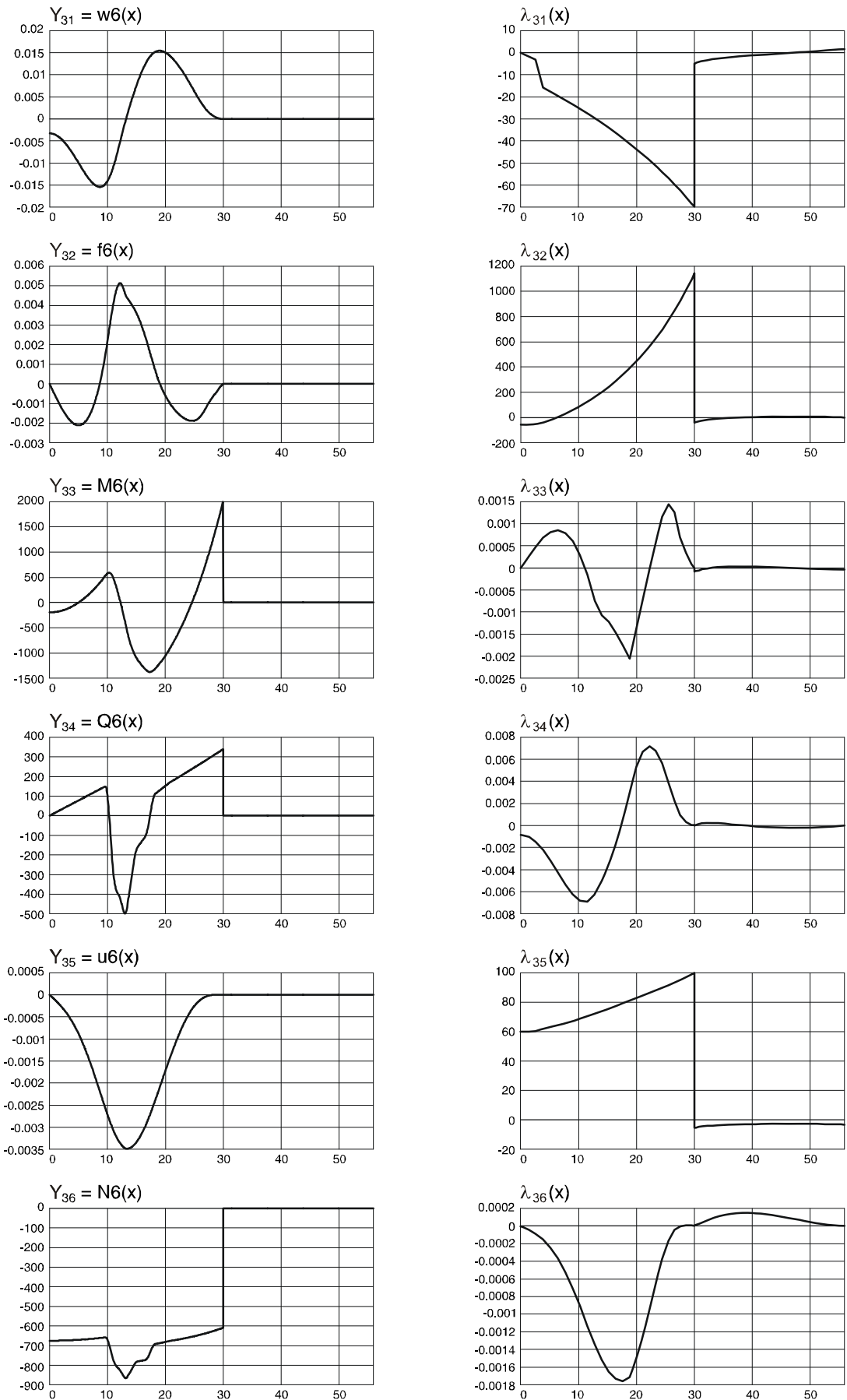
Rys. 5.28. Zmienne stanu i zmienne sprzężone w fazie montażowej 3



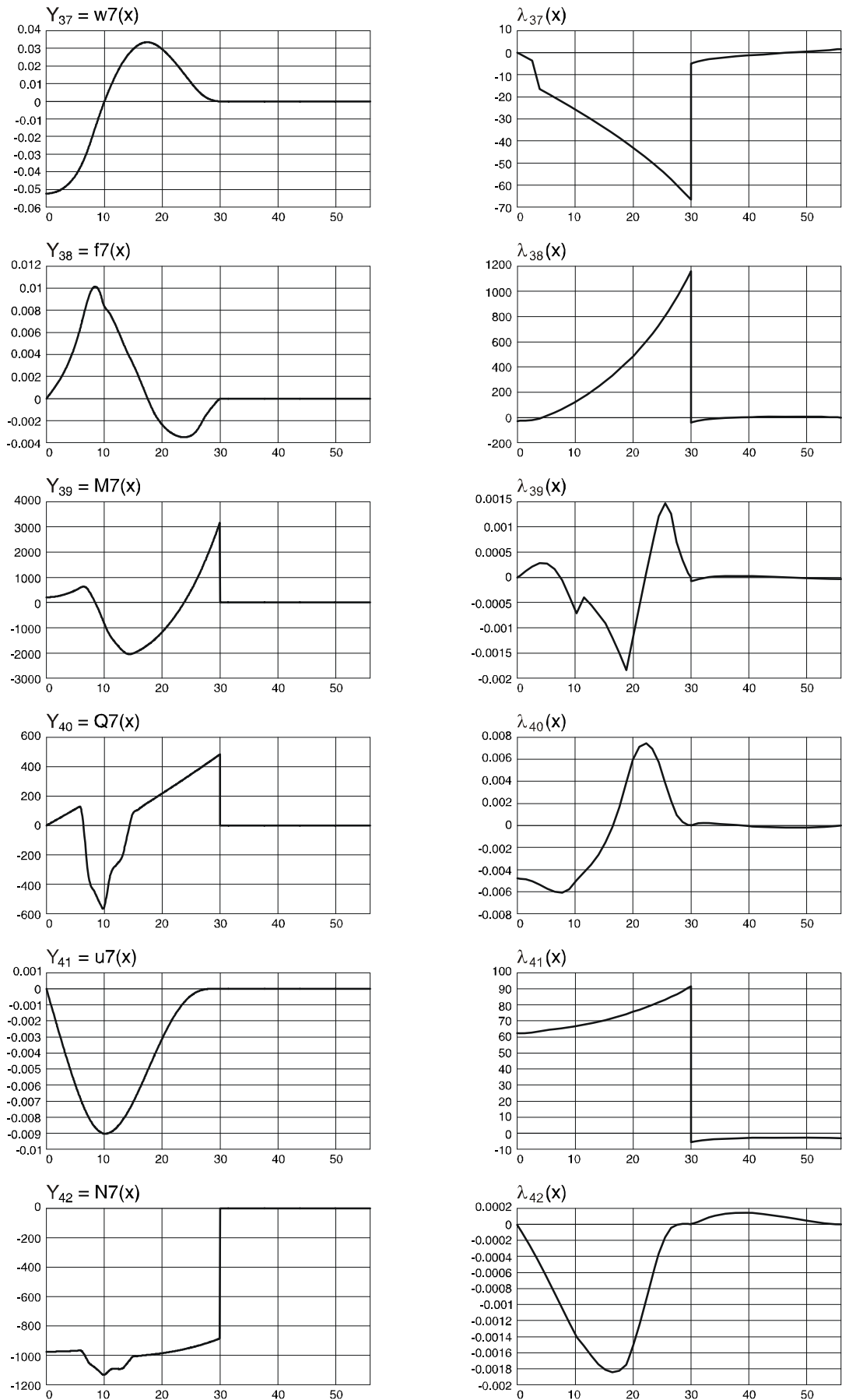
Rys. 5.29. Zmienne stanu i zmienne sprzężone w fazie montażowej 4



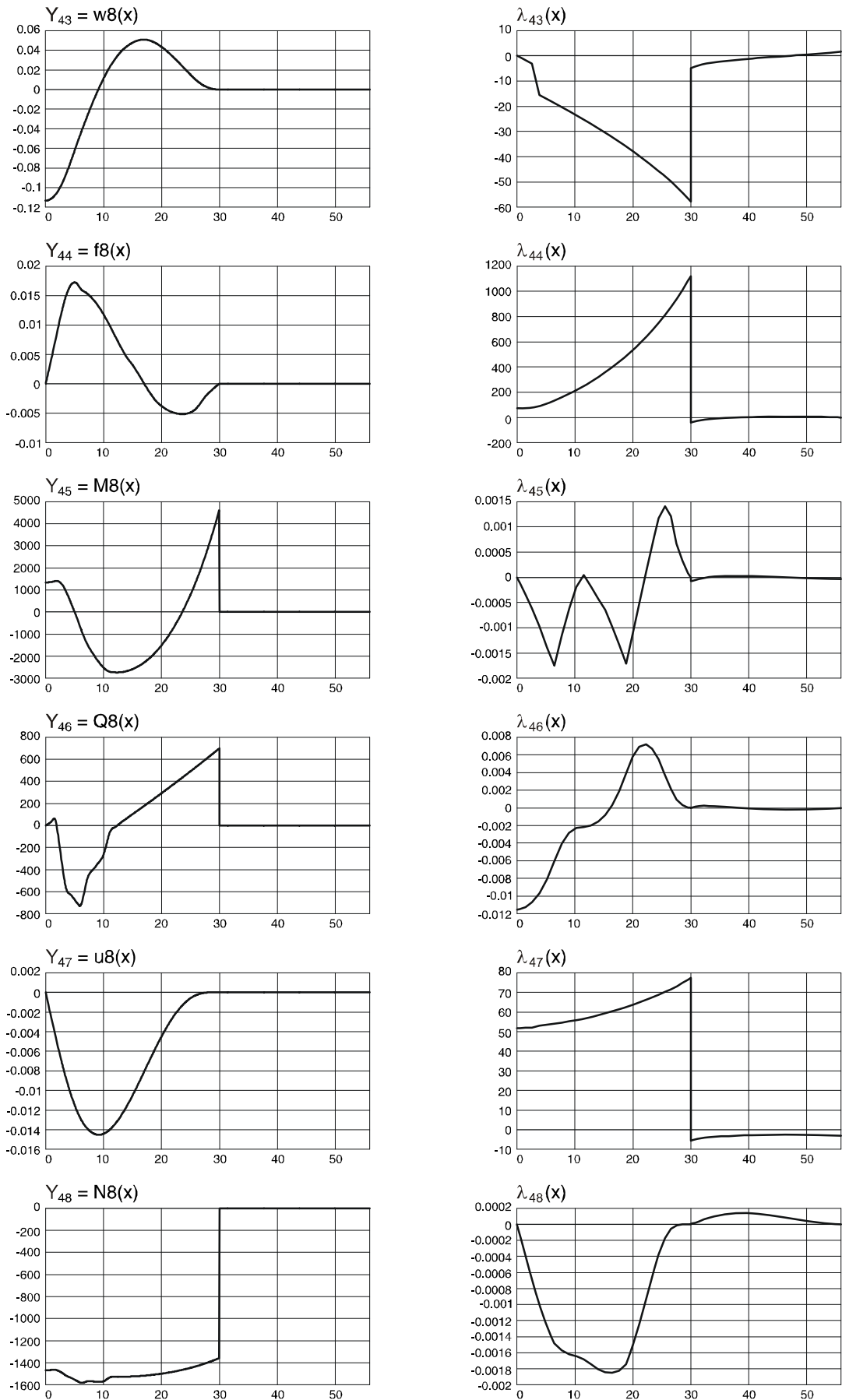
Rys. 5.30. Zmienne stanu i zmienne sprzężone w fazie montażowej 5



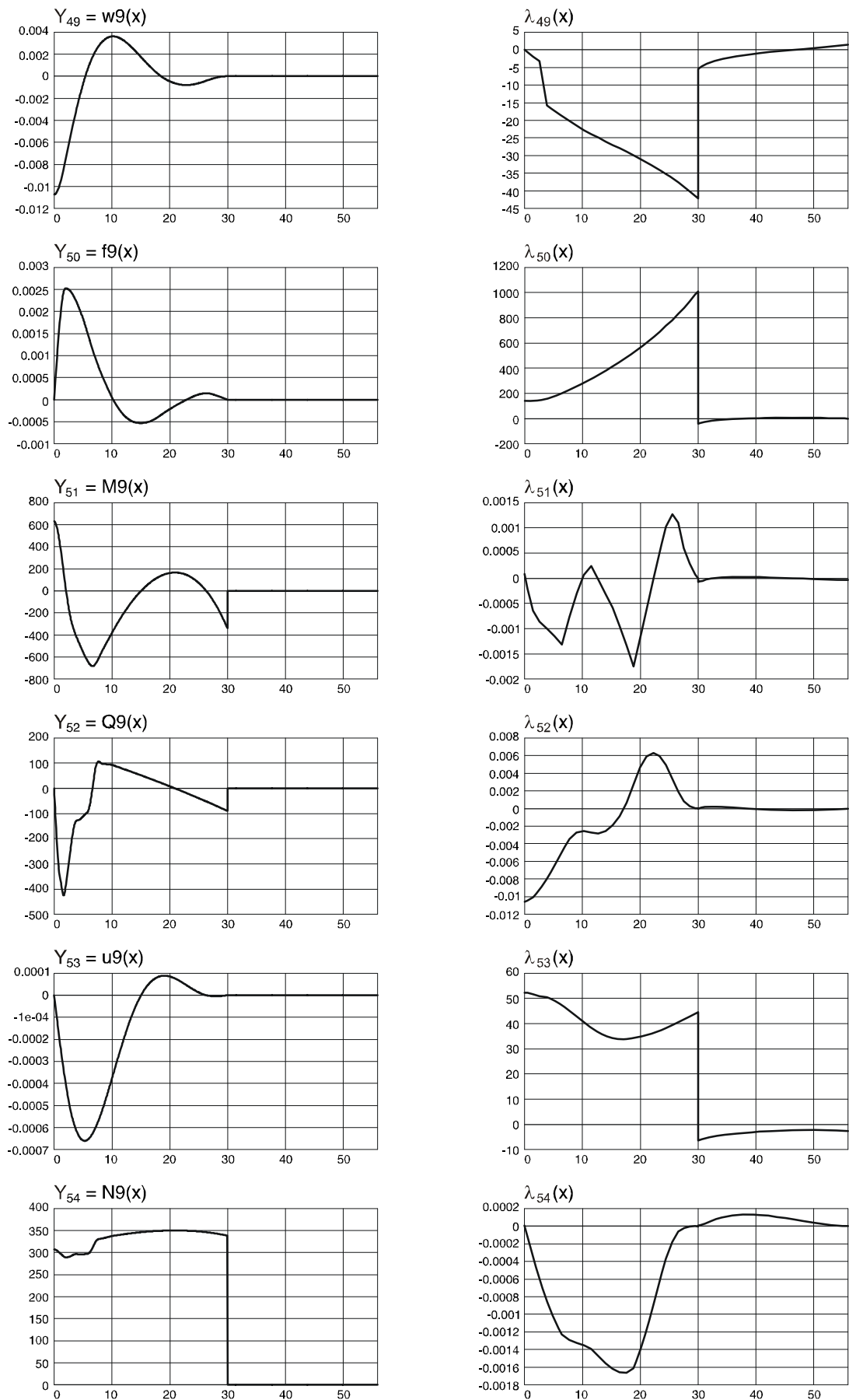
Rys. 5.31. Zmienne stanu i zmienne sprzężone w fazie montażowej 6



Rys. 5.32. Zmienne stanu i zmienne sprzężone w fazie montażowej 7

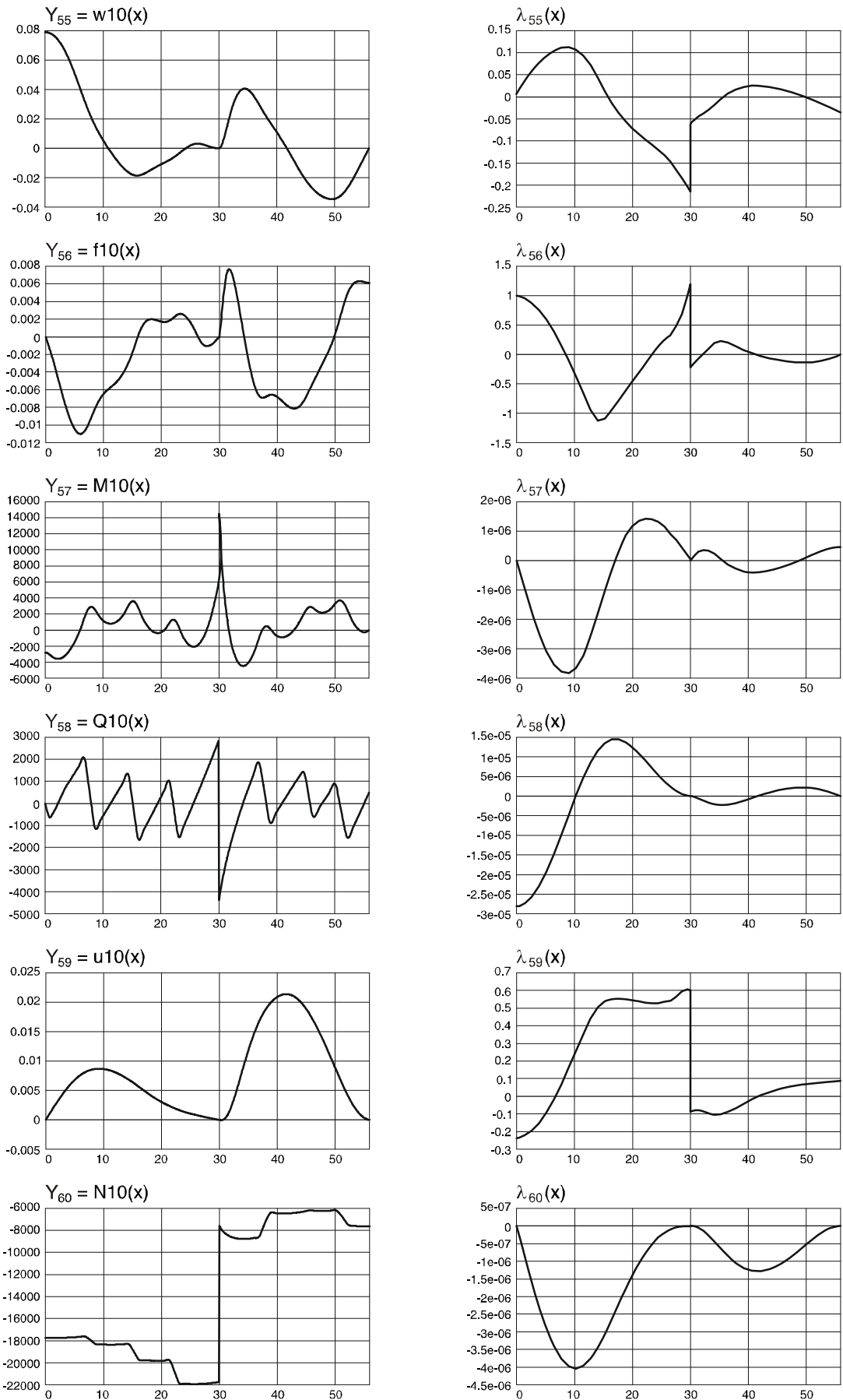


Rys. 5.33. Zmienne stanu i zmienne sprzężone w fazie montażowej 8

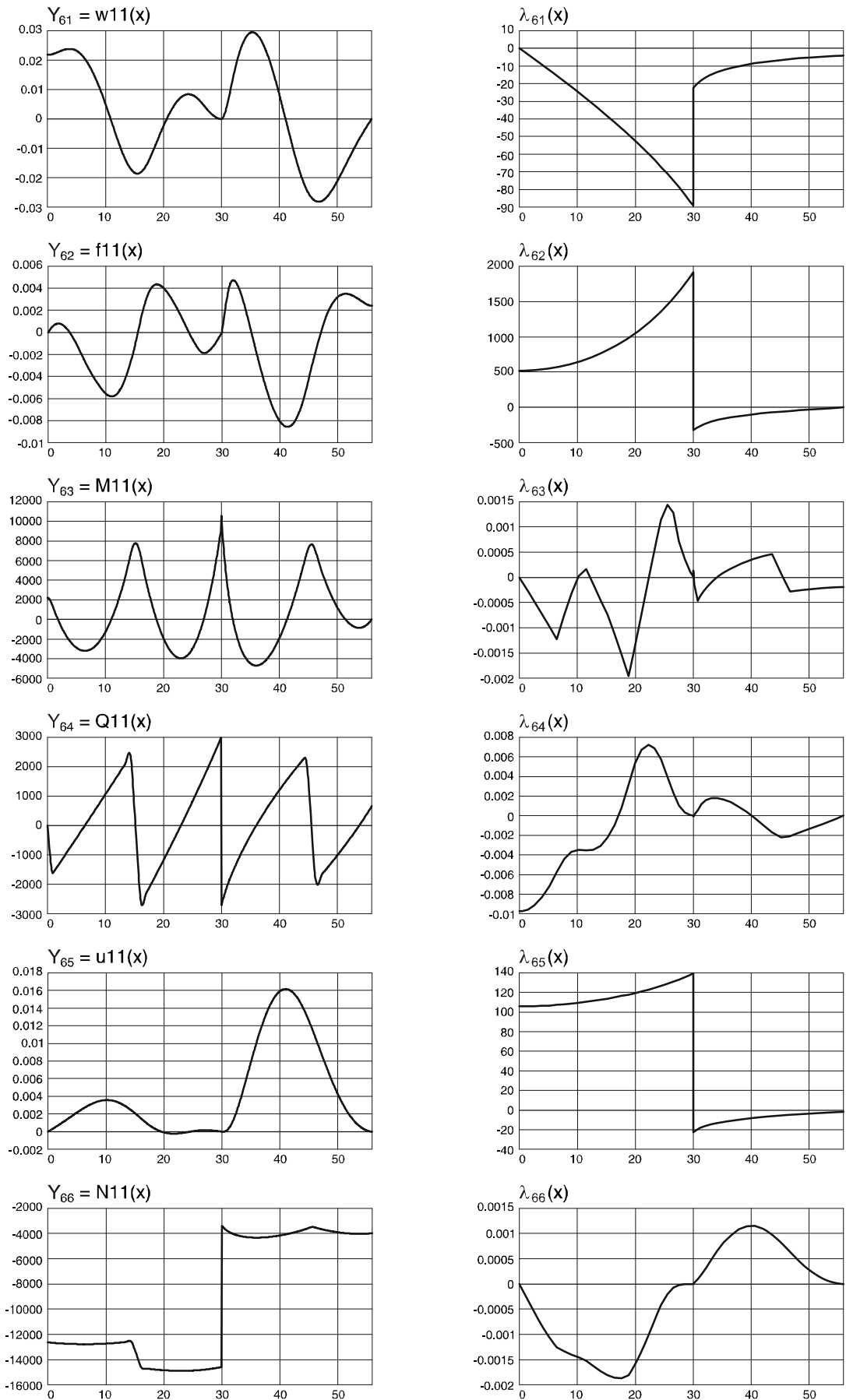


Rys. 5.34. Zmienne stanu i zmienne sprzężone w fazie montażowej 9

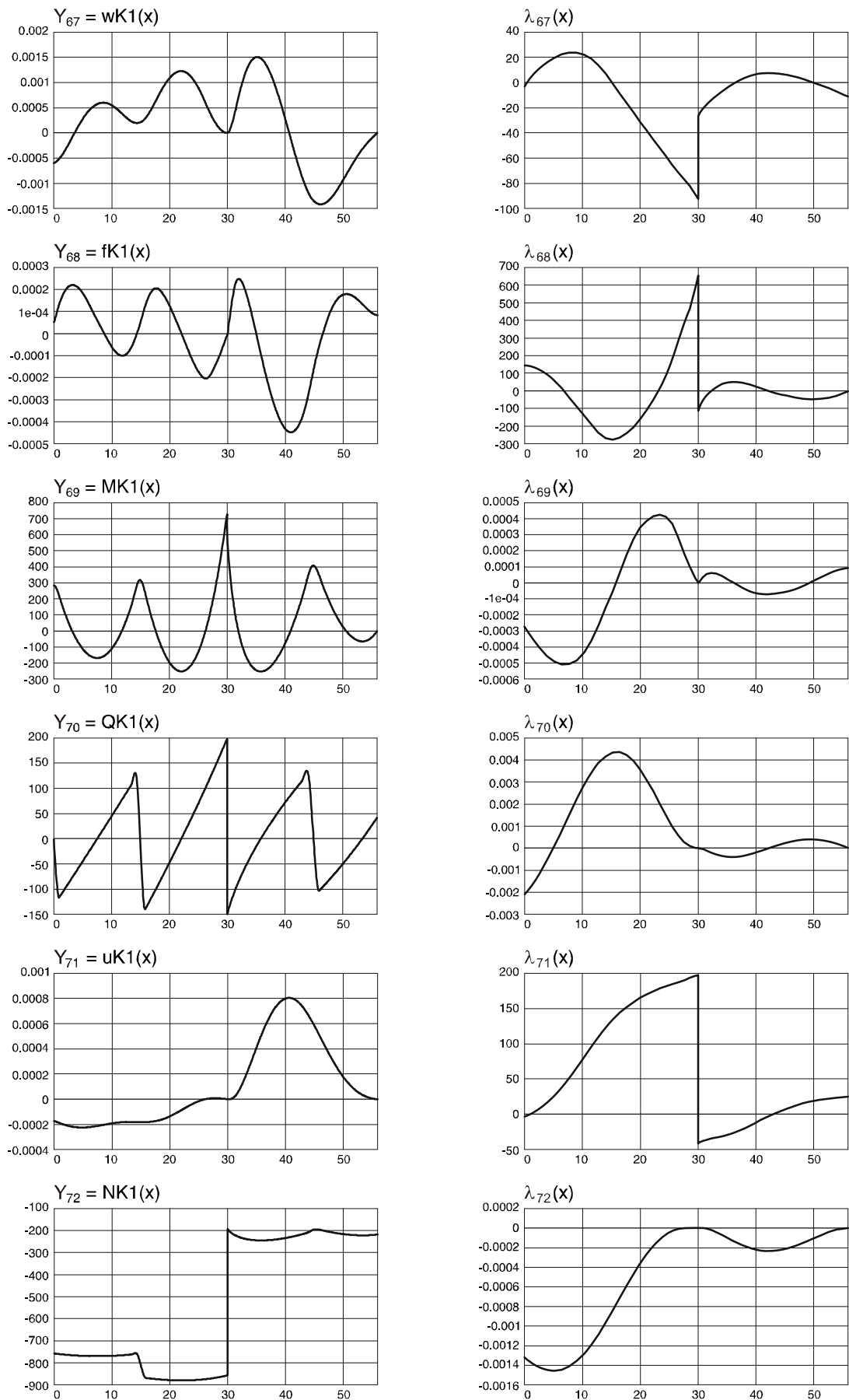




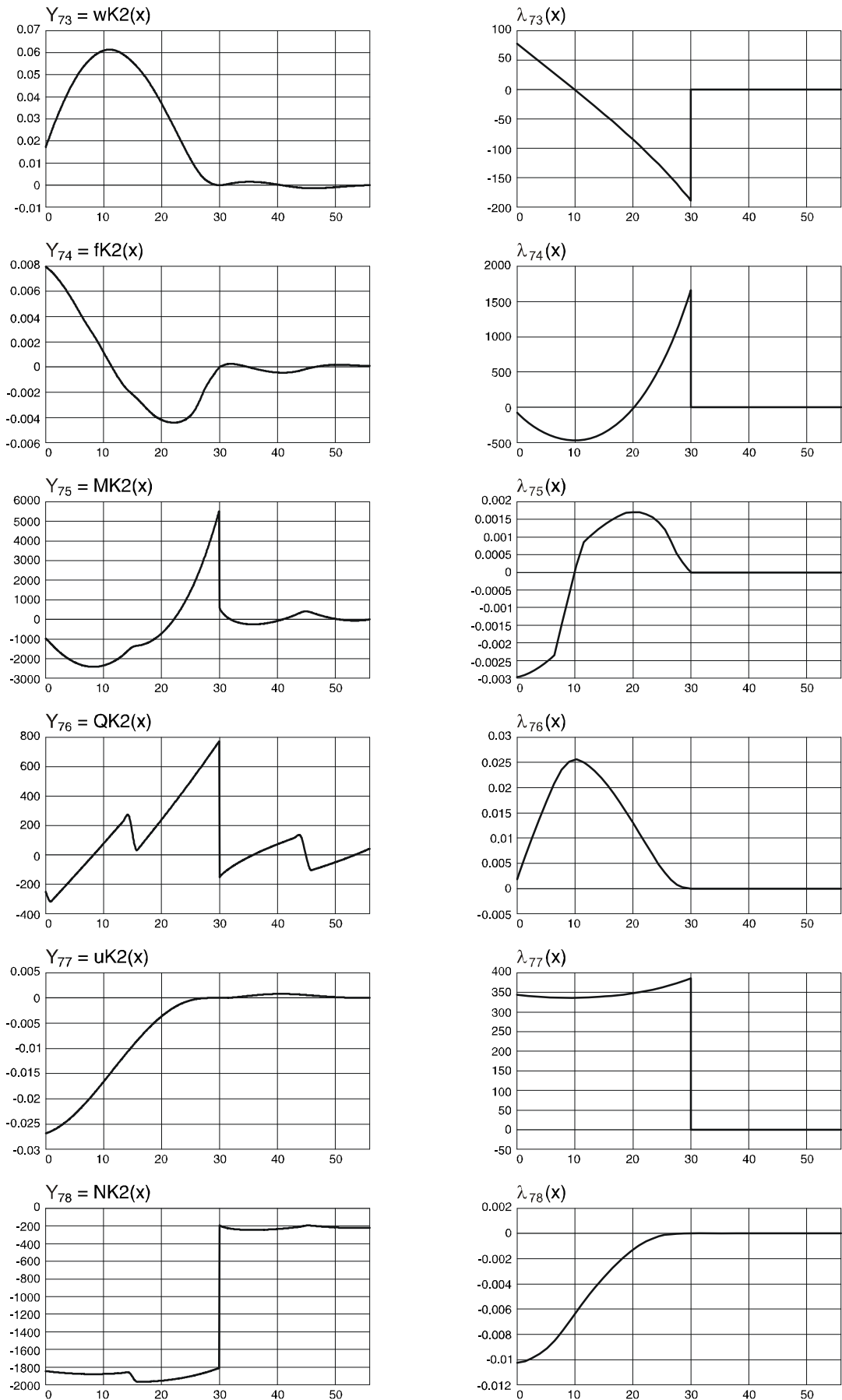
Rys. 5.35. Zmienne stanu i zmienne sprzężone w fazie montażowej 10



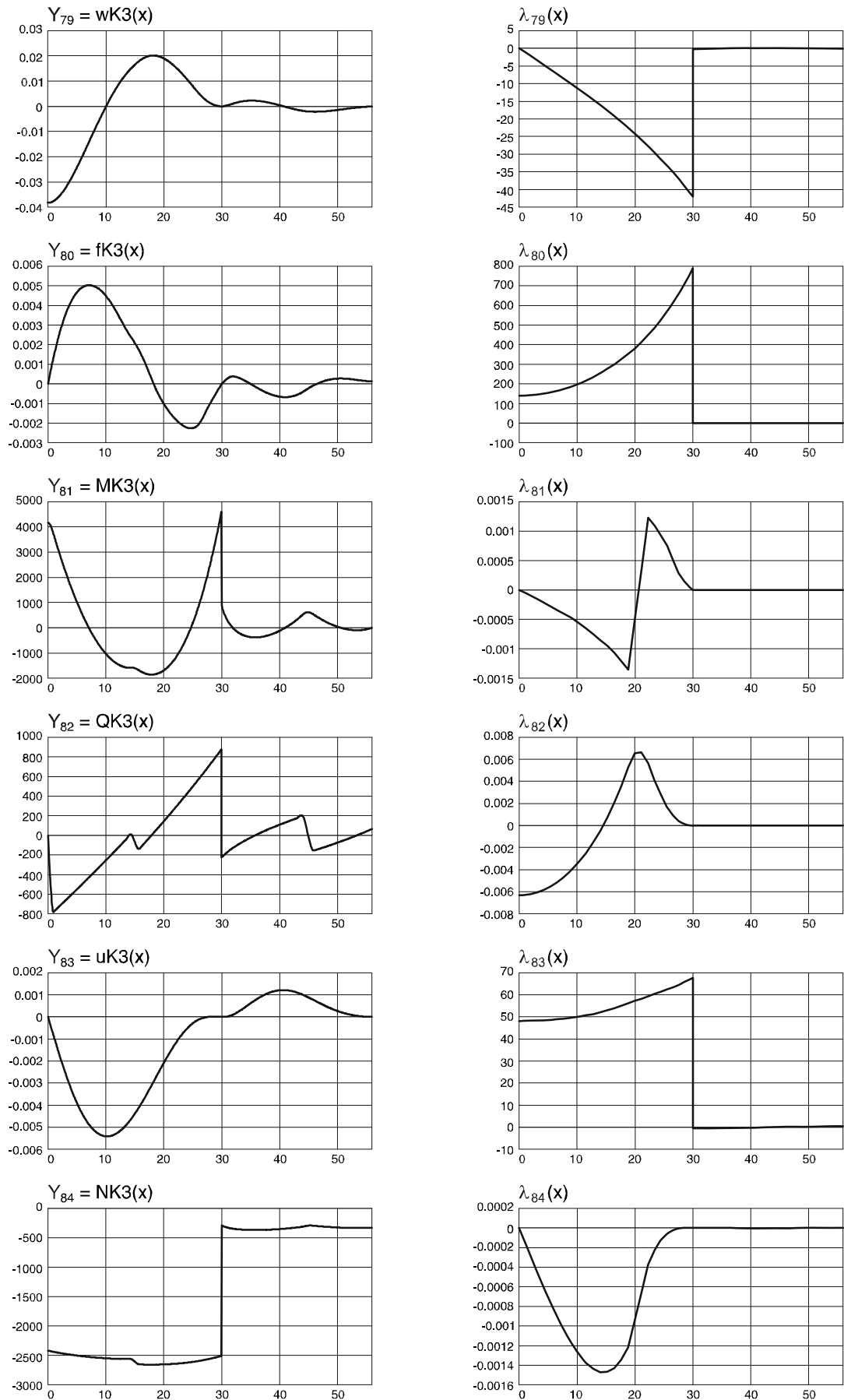
Rys. 5.36. Zmienne stanu i zmienne sprzężone w fazie eksploatacji – obciążenia stałe



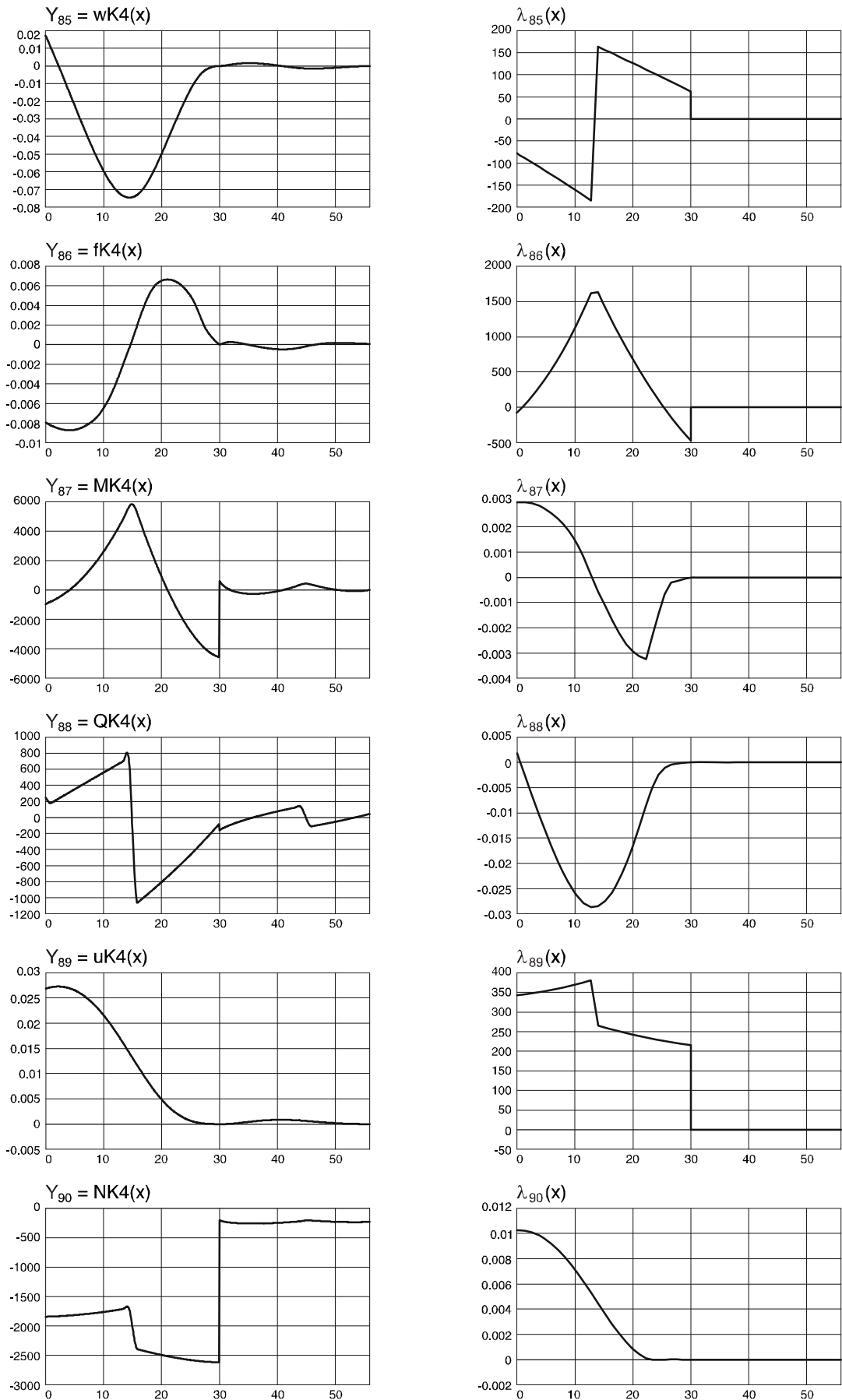
Rys. 5.37. Zmienne stanu i zmienne sprzężone w fazie eksploatacji – obciążenia zmienne (K1)



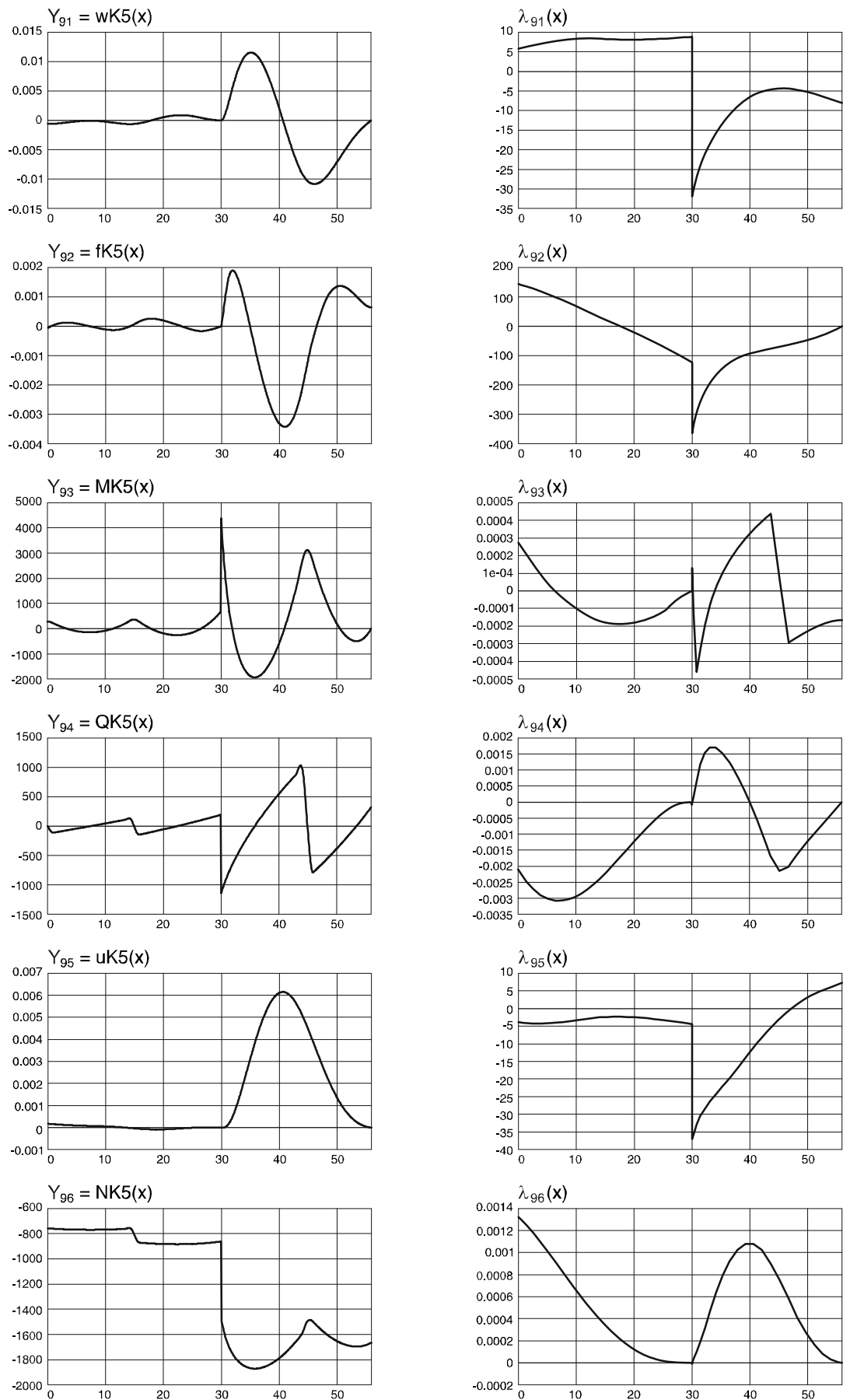
Rys. 5.38. Zmienne stanu i zmienne sprzężone w fazie eksploatacji – obciążenia zmienne (K2)



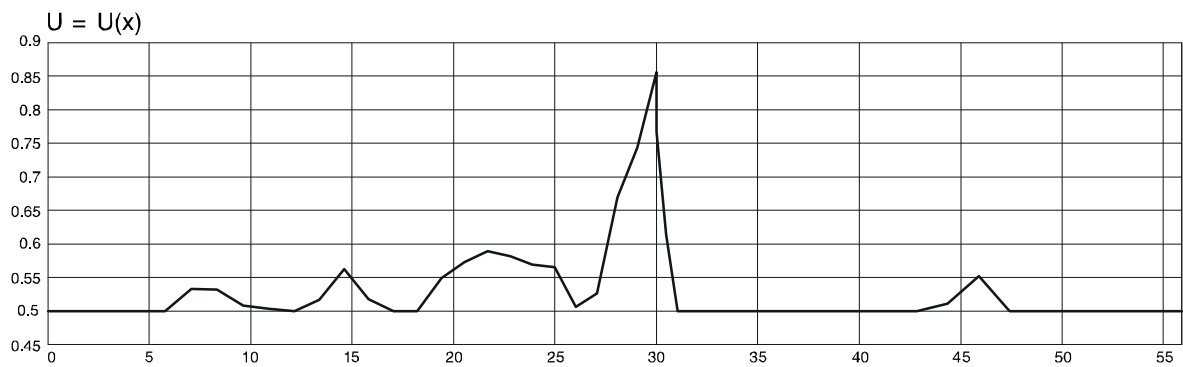
Rys. 5.39. Zmienne stanu i zmienne sprzężone w fazie eksploatacji – obciążenia zmienne (K3)



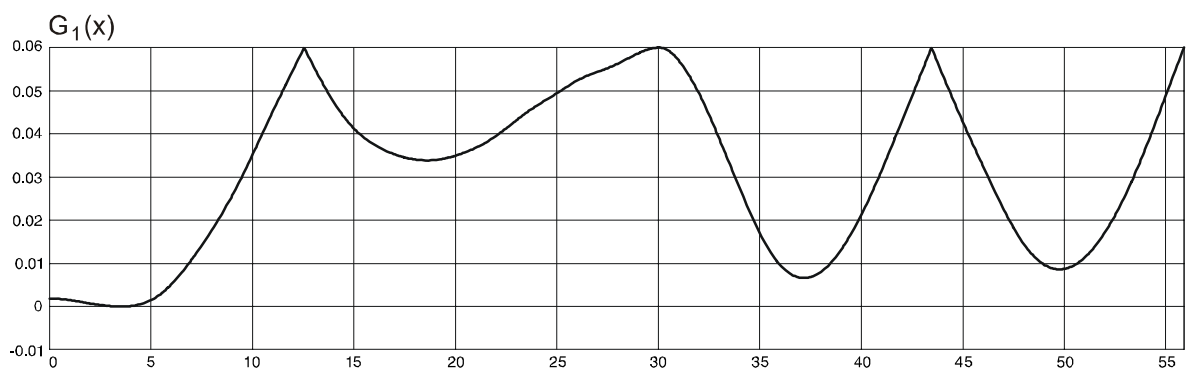
Rys. 5.40. Zmienne stanu i zmienne sprzężone w fazie eksploatacji – obciążenia zmienne (K4)



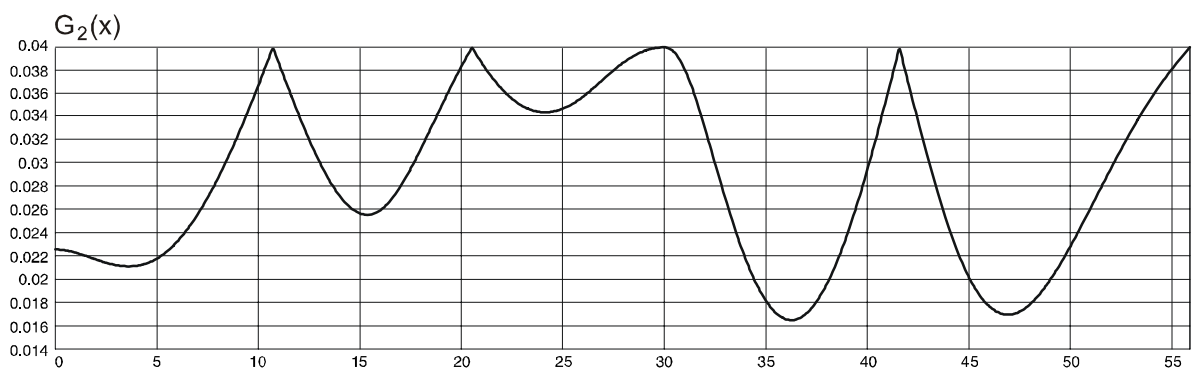
Rys. 5.41. Zmienne stanu i zmienne sprzężone w fazie eksploatacji – obciążenia zmienne (K5)



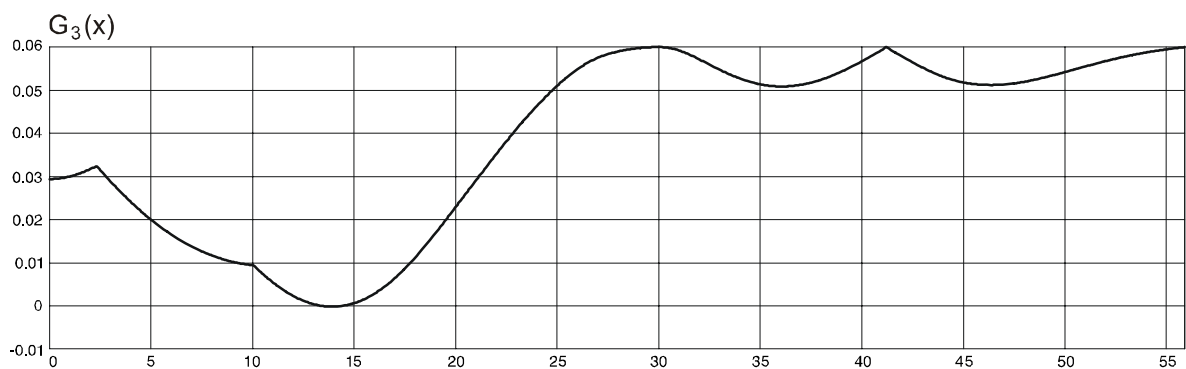
Rys. 5.42. Optymalna wysokość przekroju poprzecznego łuku – zmienna decyzyjna  $U(x)$



Rys. 5.43. Ograniczenie deformacji osi łuku wywołana montażem

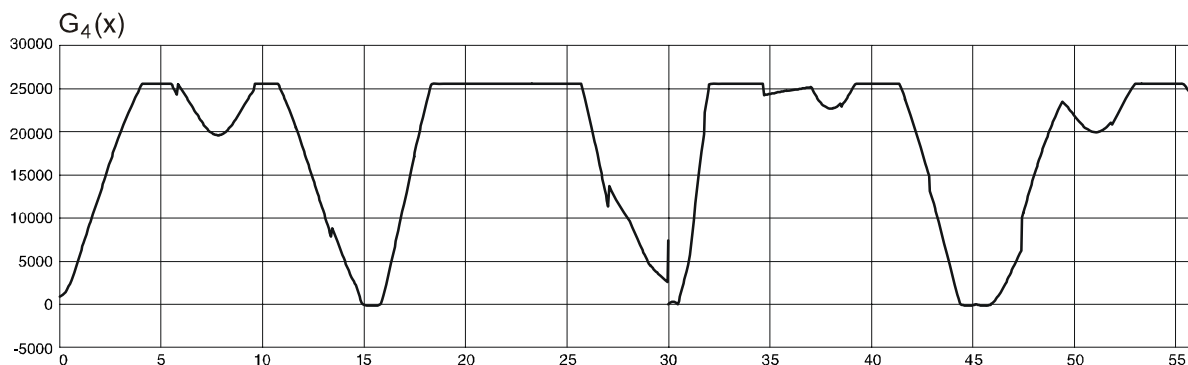


Rys. 5.44. Ograniczenie przemieszczenia pionowego od obciążeń stałych

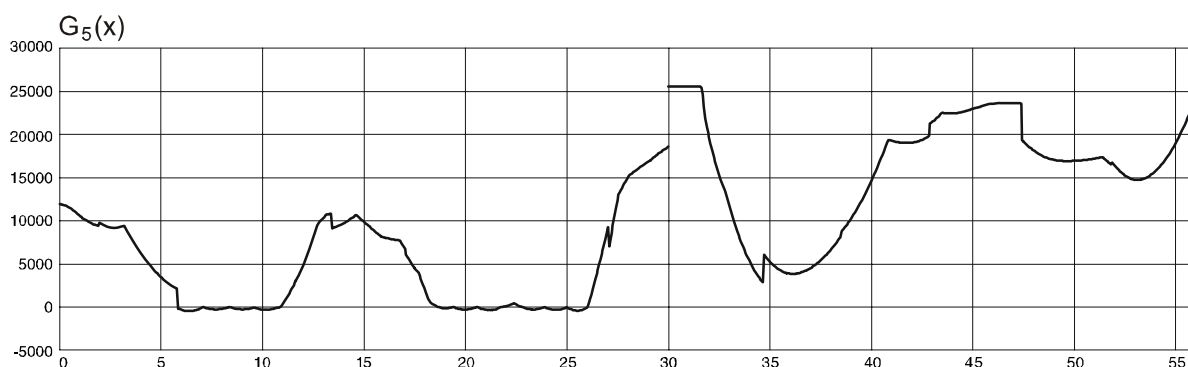


Rys. 5.45. Ograniczenie przemieszczenia pionowego od obciążeń zmiennych

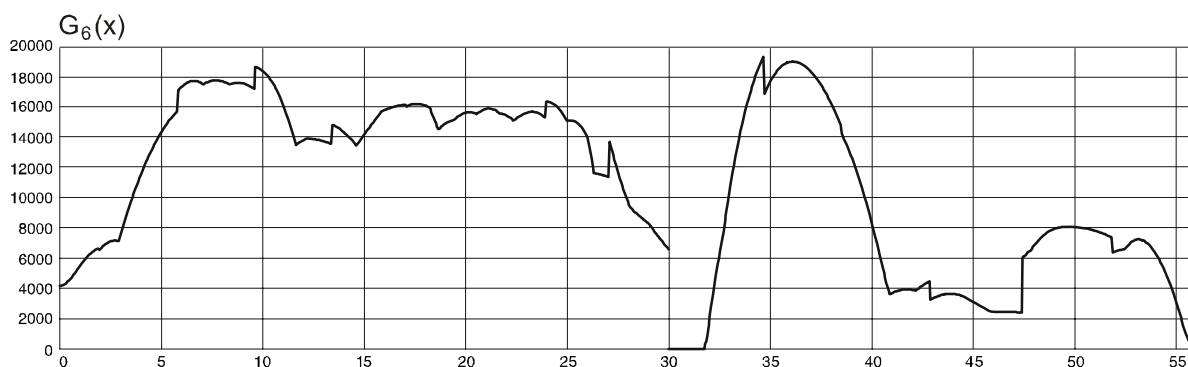




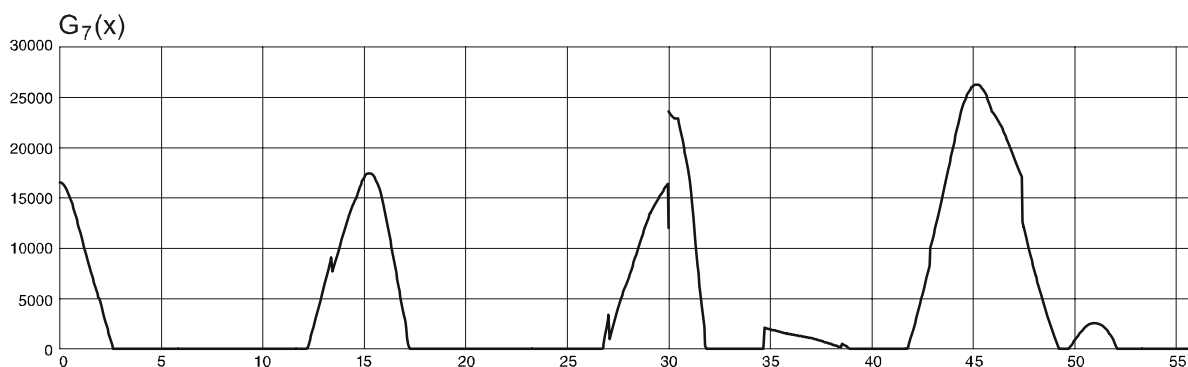
Rys. 5.46. Ograniczenie maksymalnych naprężeń ściskających na górnej powierzchni łuku



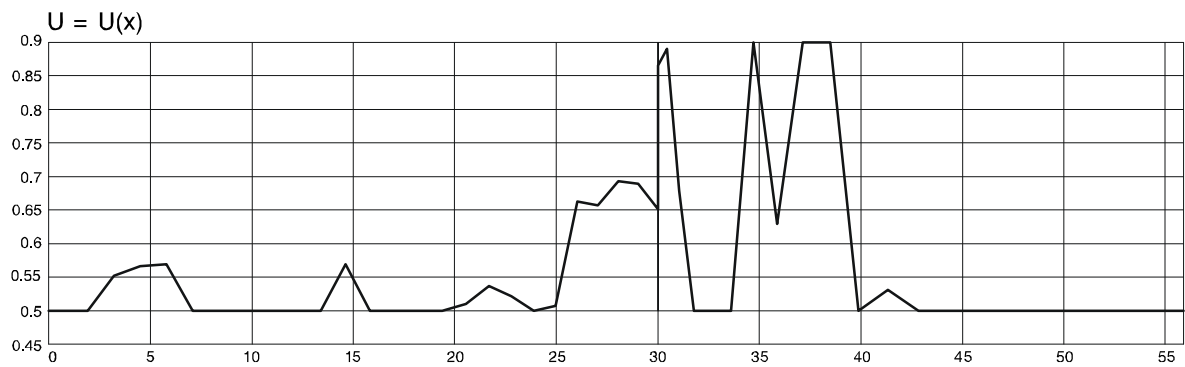
Rys. 5.47. Ograniczenie maksymalnych naprężeń ściskających na dolnej powierzchni łuku



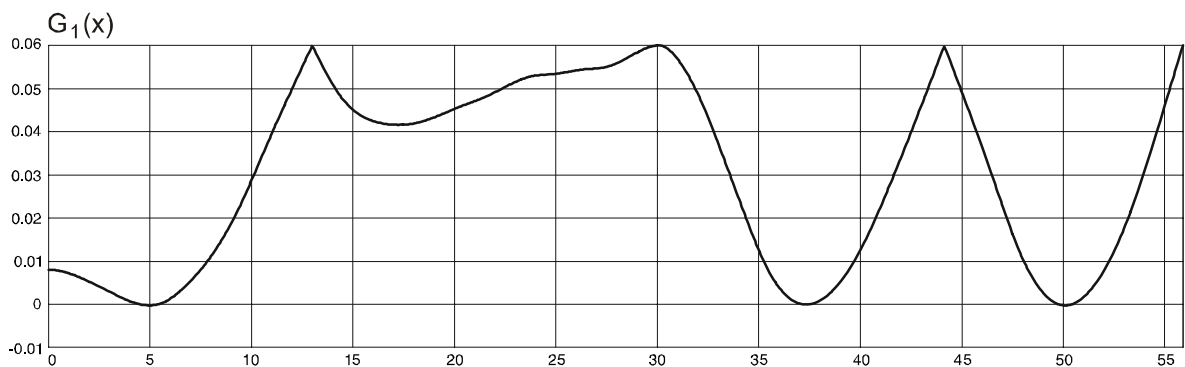
Rys. 5.48. Maksymalne hipotetyczne naprężenia rozciągające na górnej powierzchni łuku



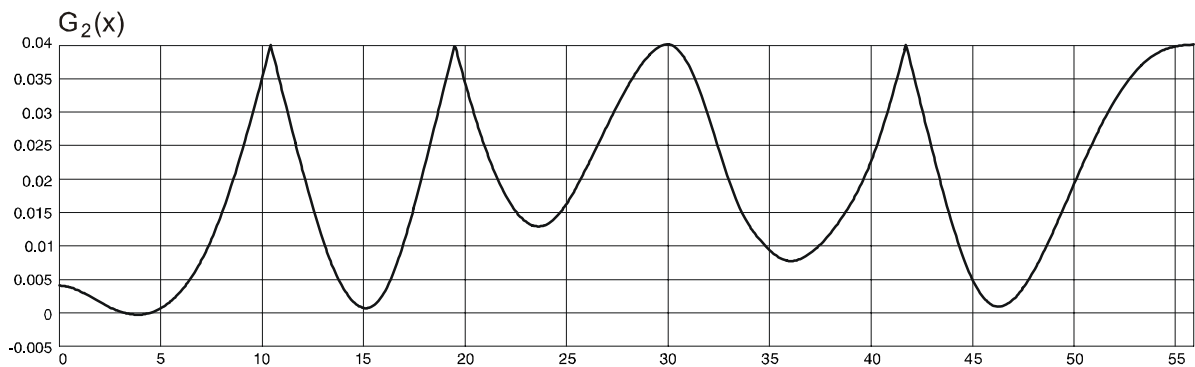
Rys. 5.49. Maksymalne hipotetyczne naprężenia rozciągające na dolnej powierzchni łuku



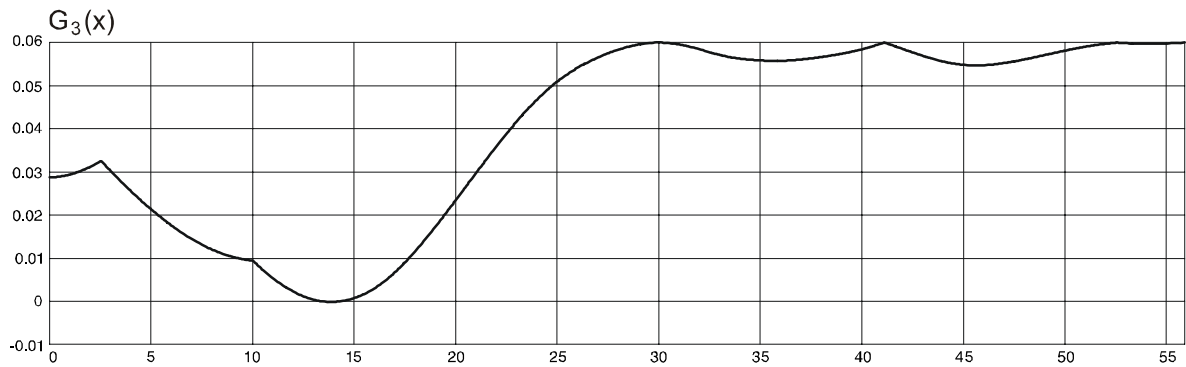
Rys. 5.50. Optymalna wysokość przekroju poprzecznego łuku wyznaczona w zadaniu z uwzględnieniem pełzania w okresie 1800 dni – zmienna decyzyjna  $U(x)$



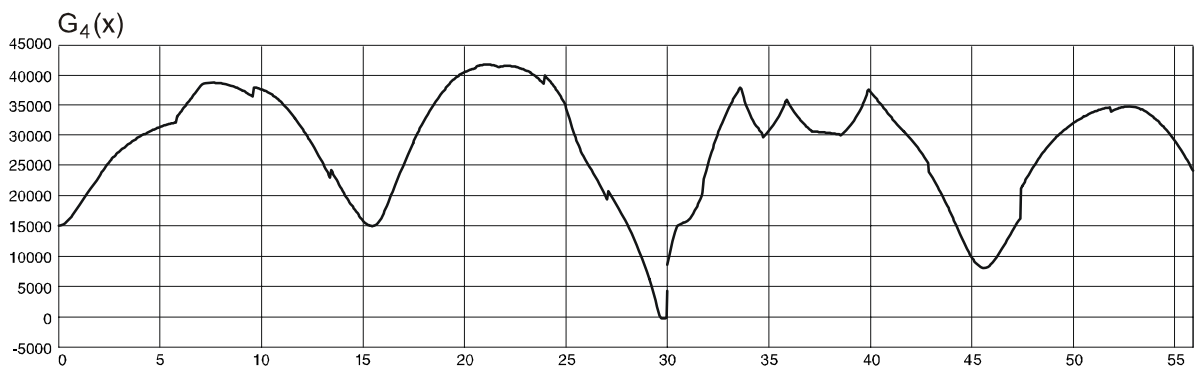
Rys. 5.51. Ograniczenie deformacji osi łuku wywołana montażem w zadaniu z uwzględnieniem pełzania w okresie 1800 dni



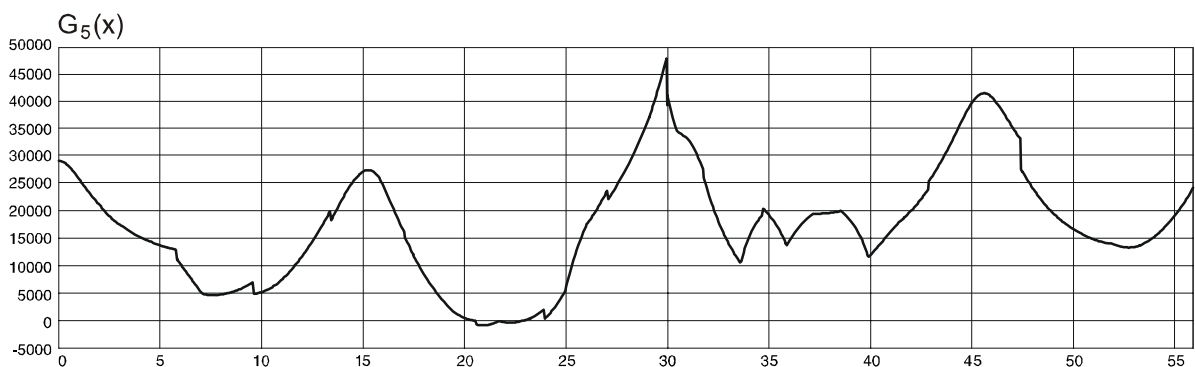
Rys. 5.52. Ograniczenie przemieszczenia pionowego od obciążeń stałych w zadaniu z uwzględnieniem pełzania w okresie 1800 dni



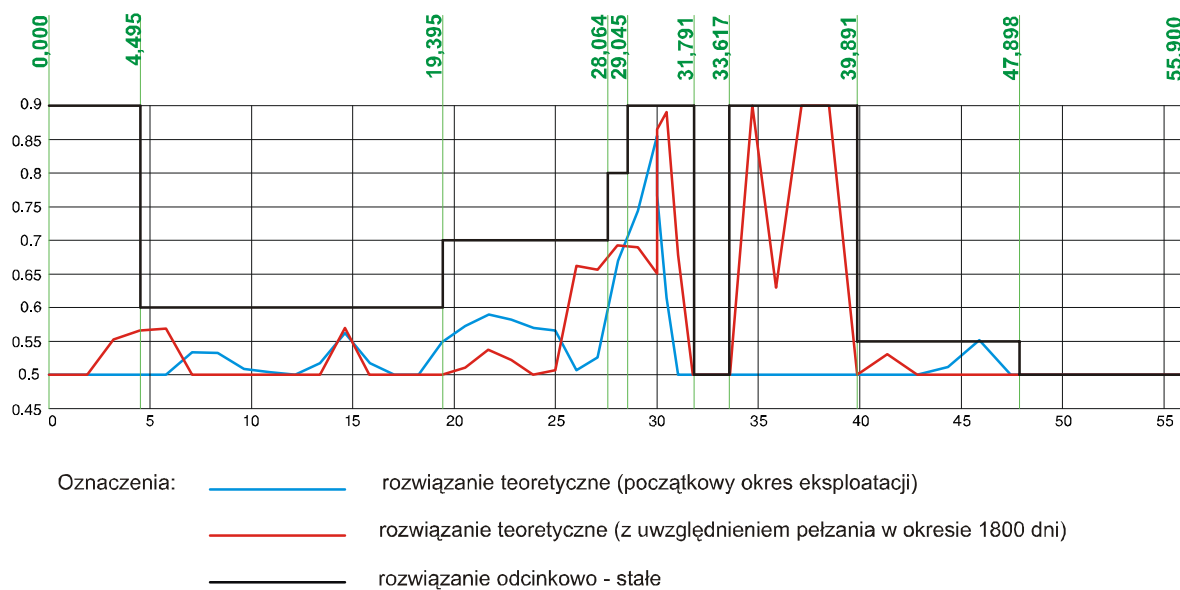
Rys. 5.53. Ograniczenie przemieszczenia pionowego od obciążeń zmiennych w zadaniu z uwzględnieniem pełzania w okresie 1800 dni



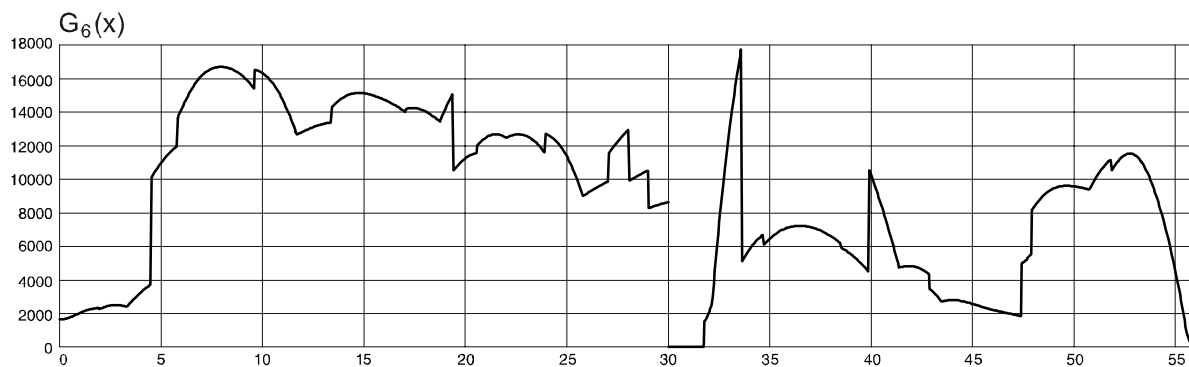
Rys. 5.54. Ograniczenie maksymalnych naprężeń ściskających na górnej powierzchni łuku w zadaniu z uwzględnieniem pełzania w okresie 1800 dni



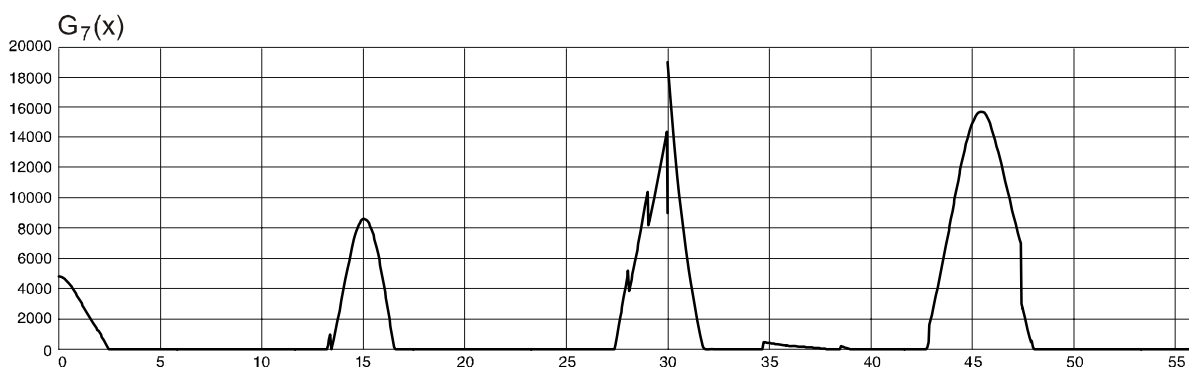
Rys. 5.55. Ograniczenie maksymalnych naprężeń ściskających na dolnej powierzchni łuku w zadaniu z uwzględnieniem pełzania w okresie 1800 dni



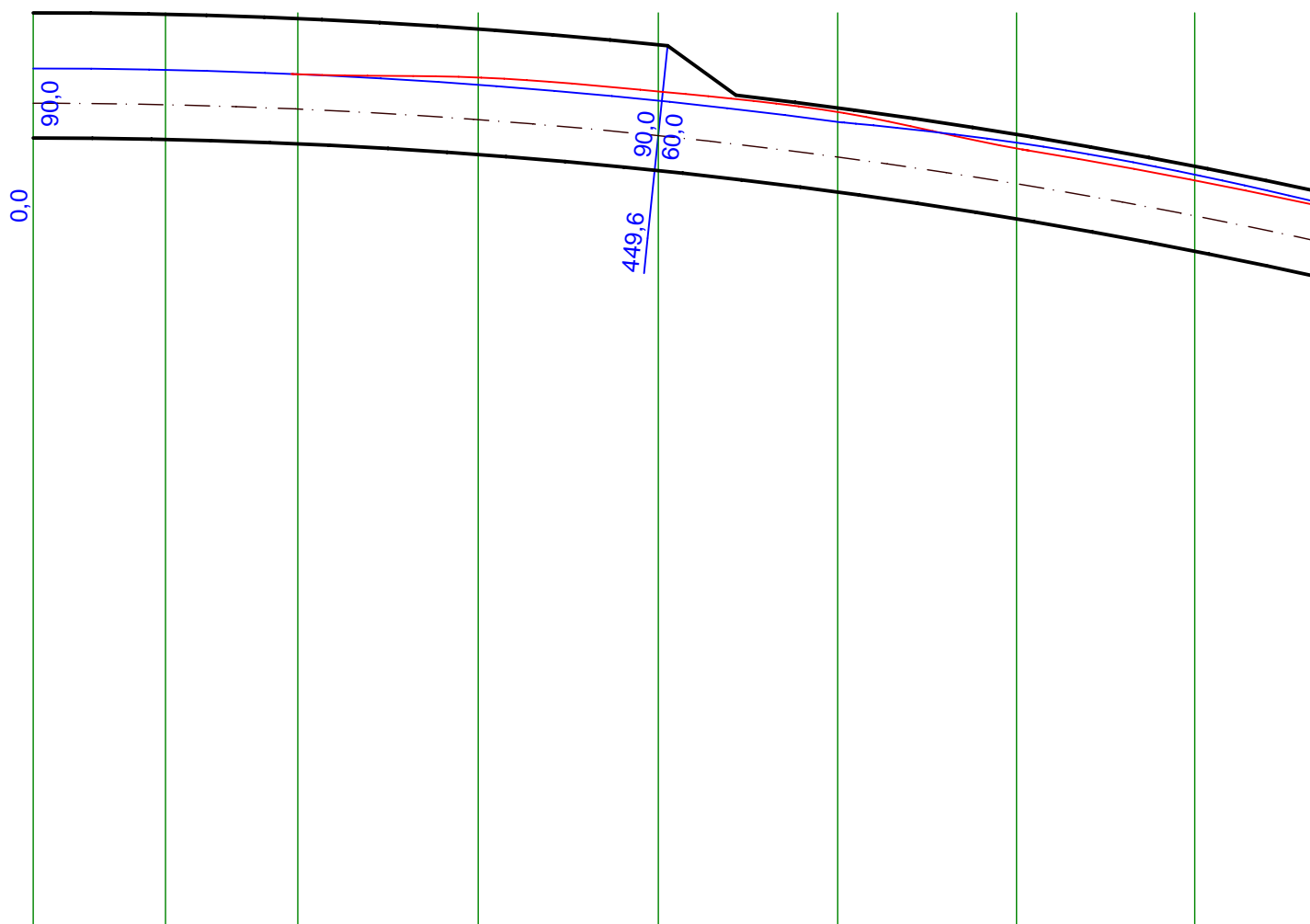
Rys. 5.56. Rozwiązanie odcinkowo - stałe



Rys. 5.57. Maksymalne hipotetyczne naprężenia rozciągające na górnej powierzchni łuku o przekroju odcinkowo - stałym



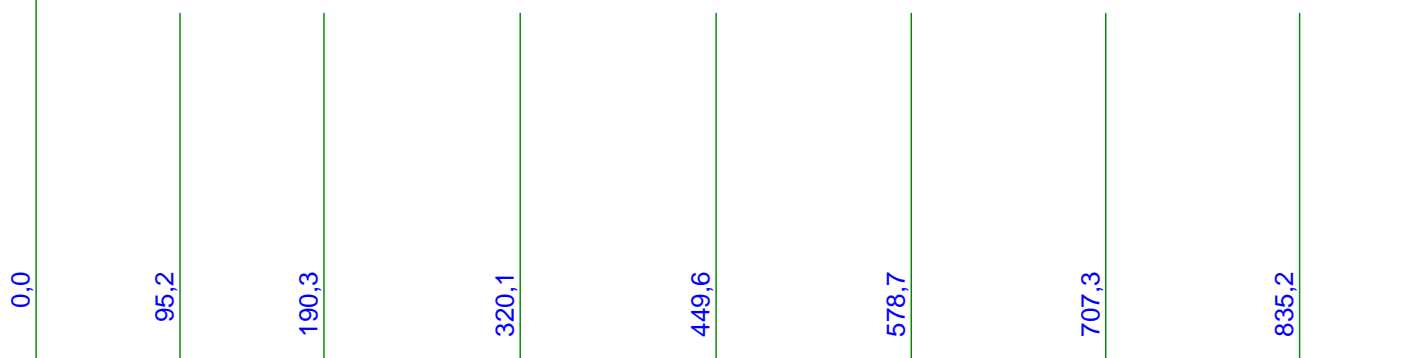
Rys. 5.58. Maksymalne hipotetyczne naprężenia rozciągające na dolnej powierzchni łuku o przekroju odcinkowo - stałym

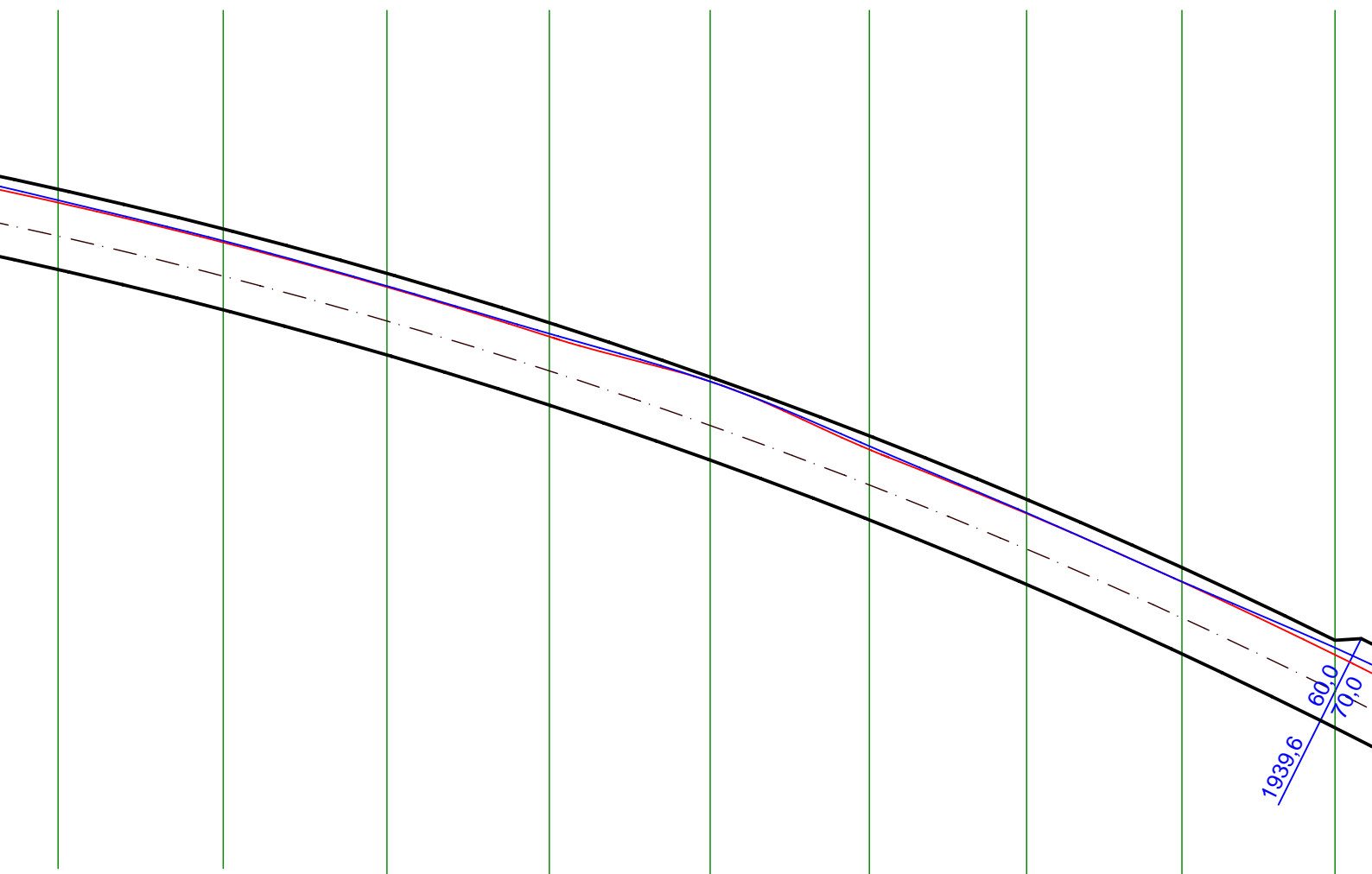


## ŁUKI ŻELBETOWE O ODCINKOWO-STALEJ WYSOKOŚCI PRZEKROJOWEJ

podziałka 1 : 50

Oznaczenia:  rozwiązanie teoretyczne (początkowy okres ekspansji)  
 rozwiązanie teoretyczne (z uwzględnieniem pełnej ekspansji)  
 rozwiązanie praktyczne odcinkowo-stałe

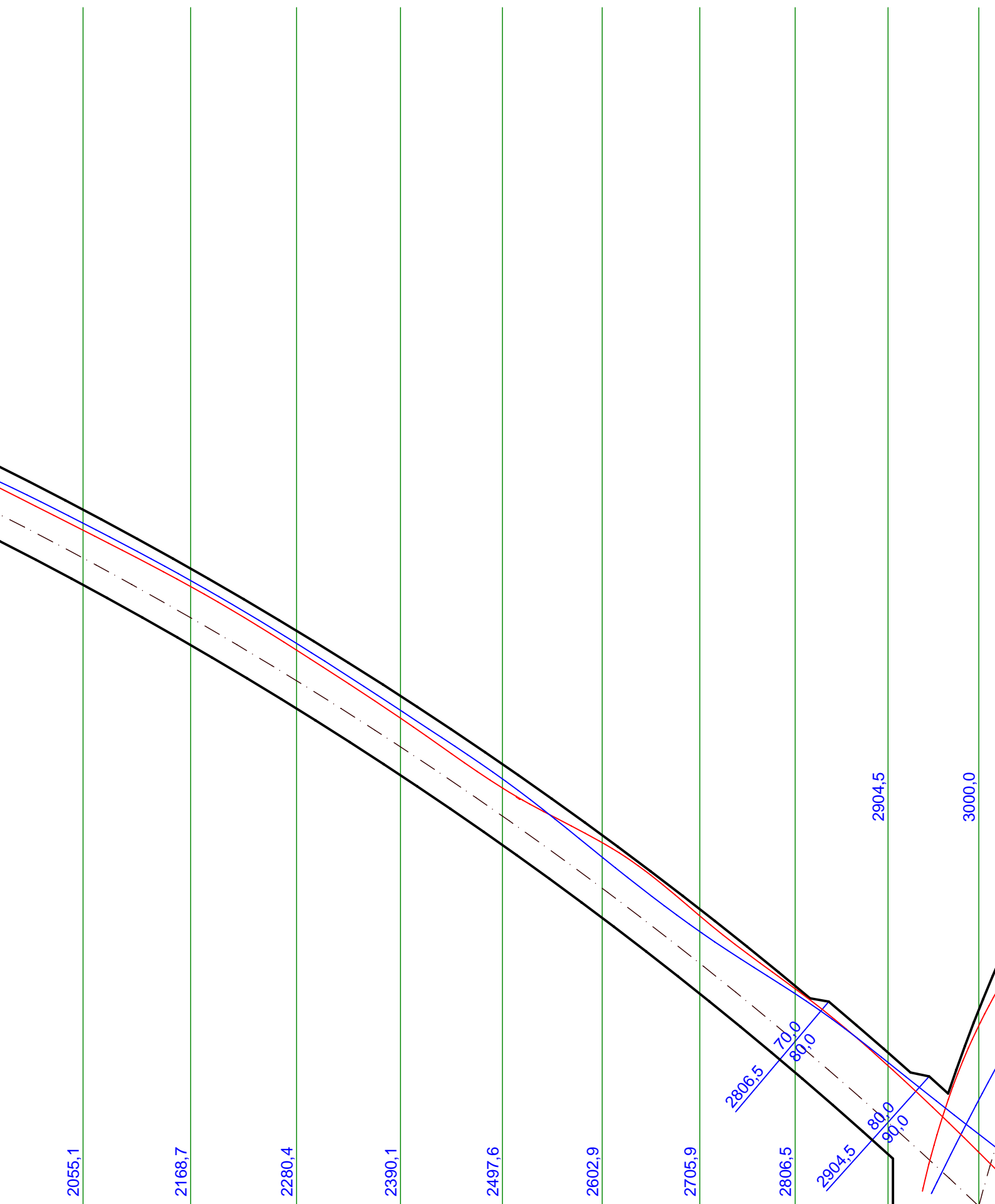


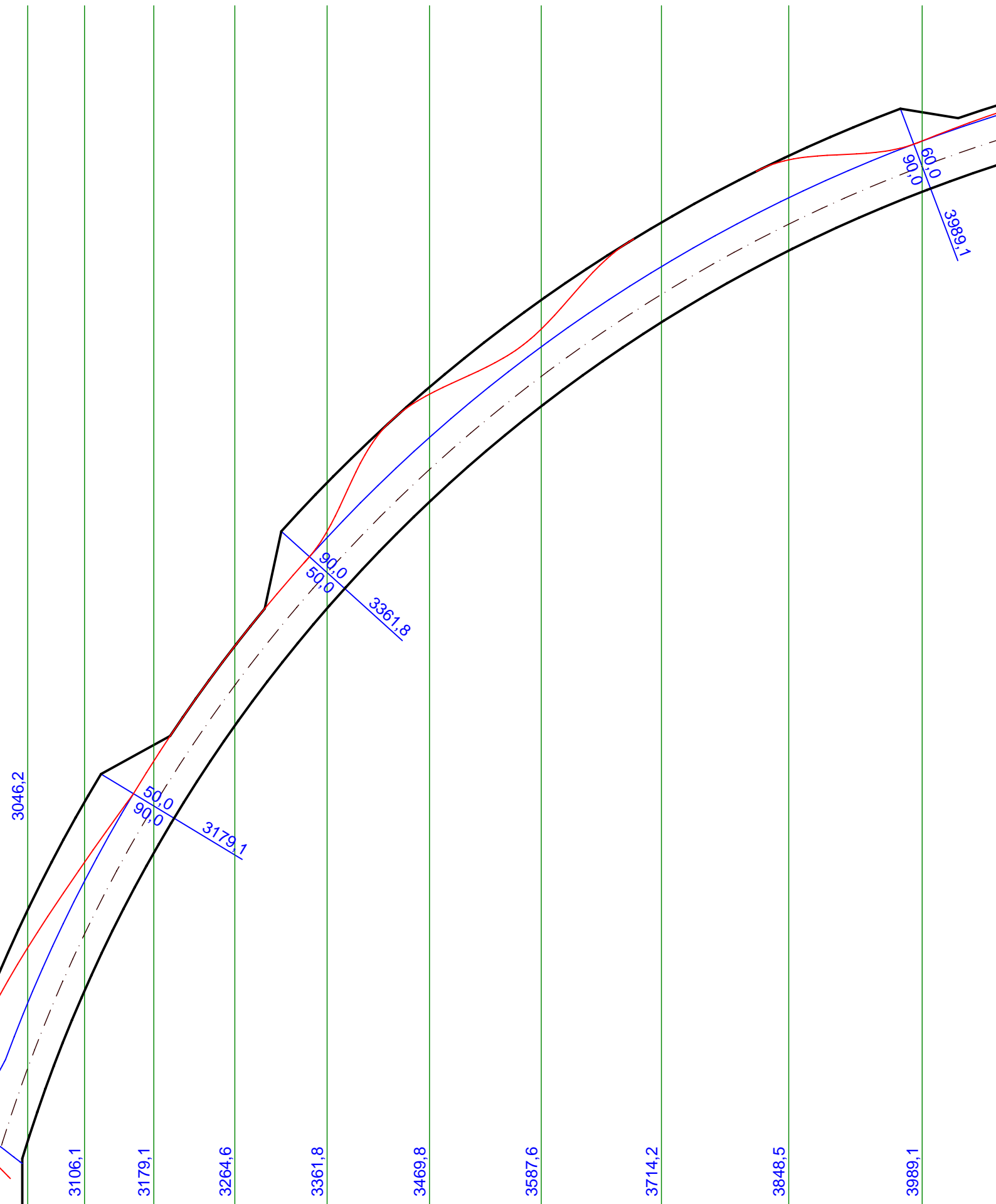


**WYKRES PRZEKROJU POPRZECZNEGO**

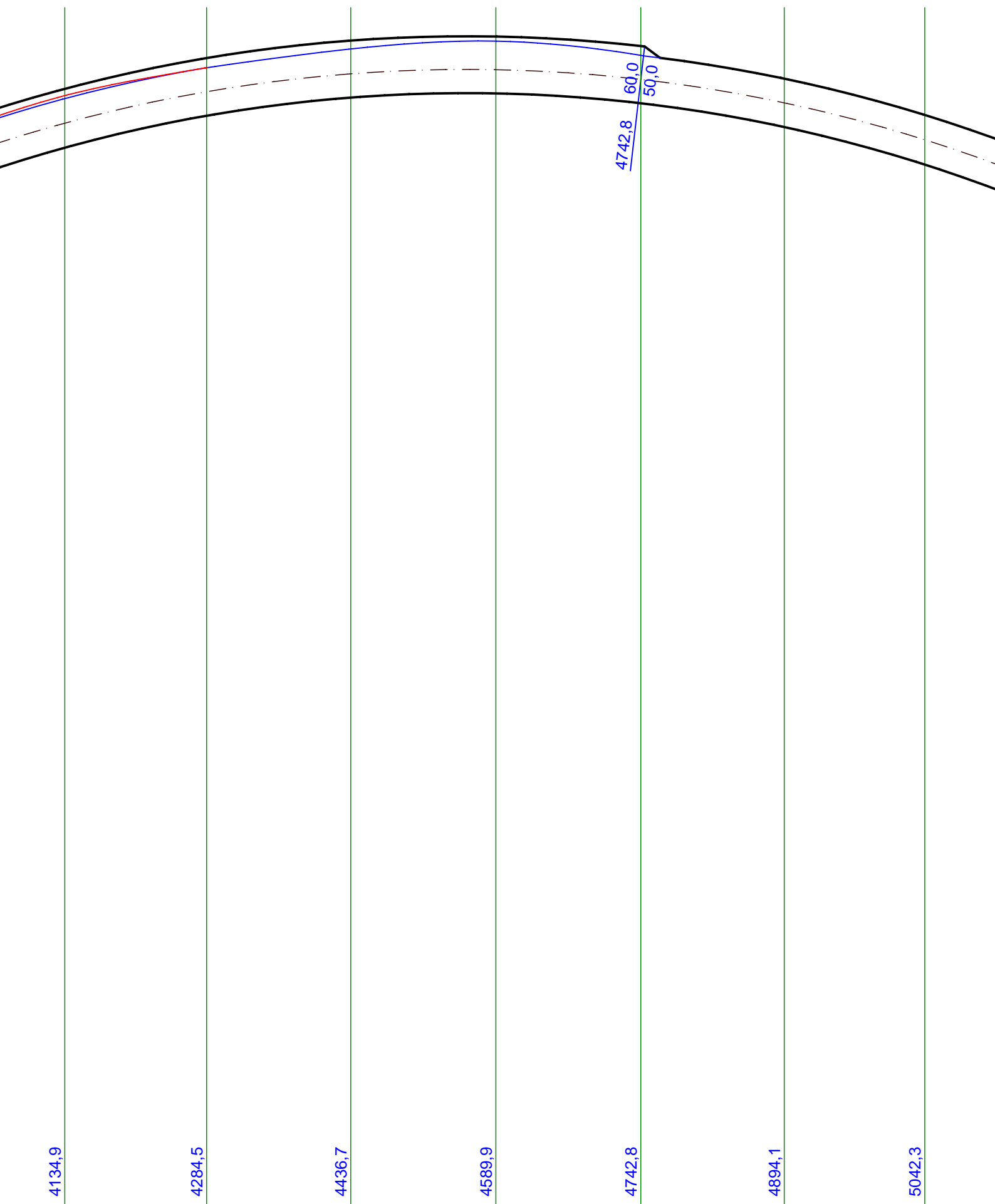
(ilości)  
 w okresie 1800 dni)

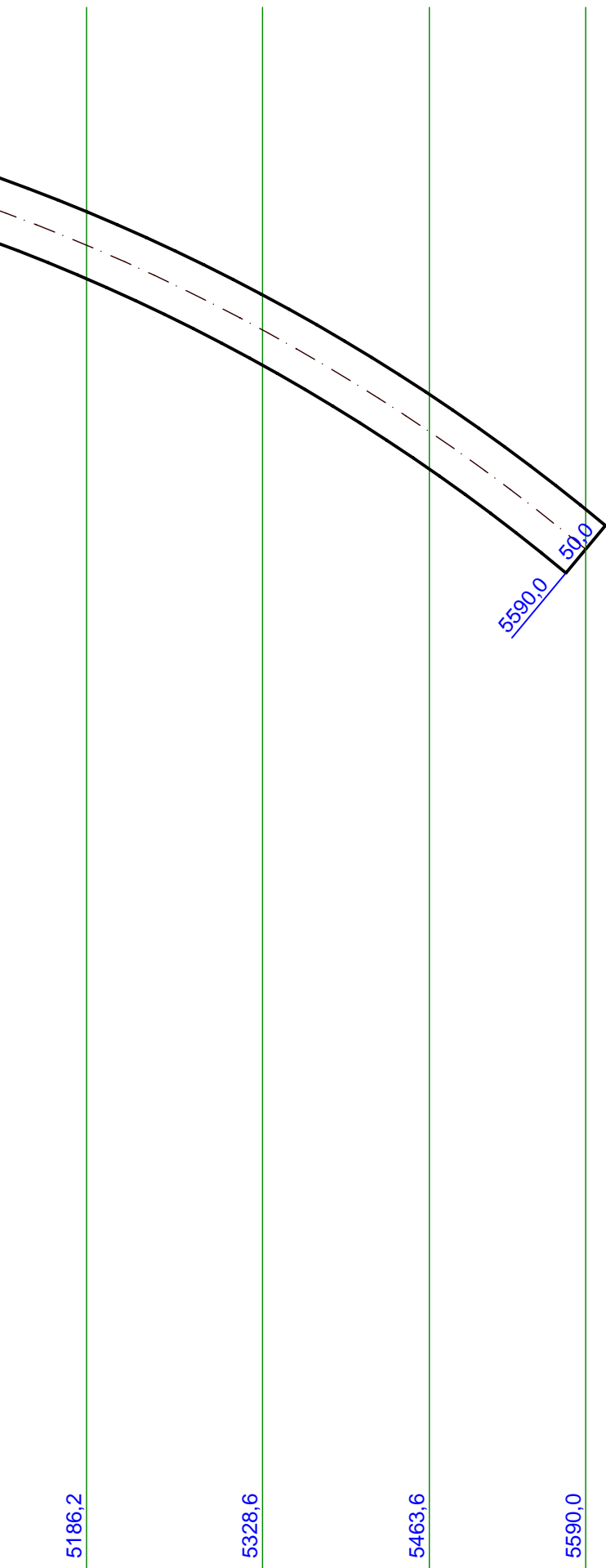
962,4      1088,7      1214,1      1338,3      1461,4      1583,2      1703,5      1822,4      1939,6











Rys. 5.59. Łuki żelbetowe o odcinkowo-stałej wysokości przekroju poprzecznego

## Rozdział 6

# Optymalizacja łuku na rusztowaniu stałym

Sformułowane w tym rozdziale zadanie dotyczy optymalnego kształtowania przekroju poprzecznego łuków żelbetowych montowanych na rusztowaniu stałym. W stosunku do rozważanego w poprzednim rozdziale problemu nie uwzględniono obecnie stanów montażowych łuku.

### 6.1 Fazy montażowe i opis uwzględnionych obciążeń

W równaniach stanu uwzględniono:

- ciężar własny łuków żelbetowych, siły skupione w miejscu usytuowania podpór stałych, które wyznaczono na podstawie zestawienia obciążeń z uwzględnieniem ciężaru mieszanki betonowej, zbrojenia, deskowania, obciążeń technologicznych, siły skupione w miejscu usytuowania podpór montażowych (stan M1) (Rys.5.23),
- obciążenia stałe, ciężar własny łuków żelbetowych, obciążenia przekazywane na łuk przez podpory stałe wywołane ciężarem własnym podpór, płyty jezdni, oraz wyposażenia w fazie eksploatacji (stan E1) (Rys.5.25),
- obciążenia zmienne (stan E2) - (Rys.5.25),
- obciążenia zmienne (stan E3) - (Rys.5.25),
- obciążenia zmienne (stan E4) - (Rys.5.25),
- obciążenia zmienne (stan E5) - (Rys.5.25),
- obciążenia zmienne (stan E6) - (Rys.5.25).

## 6.2 Sformułowanie zadania optymalizacji

Zadanie dotyczy optymalnego kształtowania wysokości przekroju poprzecznego łuku z uwzględnieniem tylko montażu płyty pomostu i sześciu, wyżej wymienionych faz eksploatacji. Ostatecznie tak przyjęty model opisany jest 43 równaniami różniczkowymi. Sens fizyczny zmiennych stanu  $y_i$  opisano w tabeli. Zmienne stanu w przyjętym modelu to:

Tab. 6.1 Zmienne stanu

Stan	M1	E1	E2	E3	E4	E5	E6
$w$ :	$y_1$	$y_7$	$y_{13}$	$y_{19}$	$y_{25}$	$y_{31}$	$y_{37}$
$\phi$ :	$y_2$	$y_8$	$y_{14}$	$y_{20}$	$y_{26}$	$y_{32}$	$y_{38}$
$M$ :	$y_3$	$y_9$	$y_{15}$	$y_{21}$	$y_{27}$	$y_{33}$	$y_{39}$
$Q$ :	$y_4$	$y_{10}$	$y_{16}$	$y_{22}$	$y_{28}$	$y_{34}$	$y_{40}$
$u$ :	$y_5$	$y_{11}$	$y_{17}$	$y_{23}$	$y_{29}$	$y_{35}$	$y_{41}$
$N$ :	$y_6$	$y_{12}$	$y_{18}$	$y_{24}$	$y_{30}$	$y_{36}$	$y_{42}$
$V$ :	$y_{43}$						

Formalny zapis zadania optymalizacji będzie następujący:

- minimalizujemy objętość betonu

$$\min_U y_{43}(L), \quad (6.1)$$

- przy ograniczeniach:

$$\begin{aligned} y'_i &= f_i(x, y_i, U) \quad i = 1 \div 43, \\ g_s &\geq 0 \quad s = 1 \div 5, \\ U(x) &\in (U_1, U_2). \end{aligned} \quad (6.2)$$

Naprężenia w górnych włóknach w stanie montażowym i stanach eksploatacji wynoszą:

$$\begin{aligned} \sigma_{bg10} &= \left( \frac{-y_3 U(x)}{2I_{10}} + \frac{y_6}{A_{10}} \right), & \sigma_{bg11} &= \left( \frac{-y_9 U(x)}{2I_{11}} + \frac{y_{12}}{A_{11}} \right) \\ \sigma_{bgk1} &= \left( \frac{-y_{15} U(x)}{2I_{11}} + \frac{y_{18}}{A_{11}} \right), & \sigma_{bgk2} &= \left( \frac{-y_{21} U(x)}{2I_{11}} + \frac{y_{24}}{A_{11}} \right), & \sigma_{bgk3} &= \left( \frac{-y_{27} U(x)}{2I_{11}} + \frac{y_{30}}{A_{11}} \right) \\ \sigma_{bgk4} &= \left( \frac{-y_{33} U(x)}{2I_{11}} + \frac{y_{36}}{A_{11}} \right), & \sigma_{bgk5} &= \left( \frac{-y_{39} U(x)}{2I_{11}} + \frac{y_{42}}{A_{11}} \right). \end{aligned} \quad (6.3)$$

Definiujemy dodatkowo wyrażenia:

$$\begin{aligned} \sup_g &= \max(\sigma_{bg10}, \quad \sigma_{bg11} + \max(\sigma_{bgk1}, \sigma_{bgk2}, \sigma_{bgk3}, \sigma_{bgk4}, \sigma_{bgk5})), \\ \inf_g &= \min(\sigma_{bg10}, \quad \sigma_{bg11} + \min(\sigma_{bgk1}, \sigma_{bgk2}, \sigma_{bgk3}, \sigma_{bgk4}, \sigma_{bgk5})). \end{aligned} \quad (6.4)$$

Naprężenia w dolnych włóknach wynoszą:

$$\begin{aligned}\sigma_{bd10} &= \left(\frac{y_3 U(x)}{2I_{10}} + \frac{y_6}{A_{10}}\right), & \sigma_{bd11} &= \left(\frac{y_9 U(x)}{2I_{11}} + \frac{y_{12}}{A_{10}}\right), \\ \sigma_{bdk1} &= \left(\frac{y_{15} U(x)}{2I_{11}} + \frac{y_{18}}{A_{11}}\right), & \sigma_{bdk2} &= \left(\frac{y_{21} U(x)}{2I_{11}} + \frac{y_{24}}{A_{11}}\right), & \sigma_{bdk3} &= \left(\frac{y_{27} U(x)}{2I_{11}} + \frac{y_{30}}{A_{11}}\right), \\ \sigma_{bdk4} &= \left(\frac{y_{33} U(x)}{2I_{11}} + \frac{y_{36}}{A_{11}}\right), & \sigma_{bdk5} &= \left(\frac{y_{39} U(x)}{2I_{11}} + \frac{y_{42}}{A_{11}}\right).\end{aligned}\quad (6.5)$$

Definiujemy wyrażenia:

$$\begin{aligned}\sup_d &= \max(\sigma_{bd10}, \sigma_{bd11} + \max(\sigma_{bdk1}, \sigma_{bdk2}, \sigma_{bdk3}, \sigma_{bdk4}, \sigma_{bdk5})), \\ \inf_d &= \min(\sigma_{bd10}, \sigma_{bd11} + \min(\sigma_{bdk1}, \sigma_{bdk2}, \sigma_{bdk3}, \sigma_{bdk4}, \sigma_{bdk5})).\end{aligned}\quad (6.6)$$

Ostatecznie w rozważanym przykładzie ograniczenia  $g_4, g_5$  przyjmują postać:

$$g_4 = f_{cd} + \inf_g, \quad g_5 = f_{cd} + \inf_d. \quad (6.7)$$

Zasada minimum (5.68-5.70) pozwala sformułować wielopunktowy problem brzegowy wraz ze strukturą sterowania. Struktura sterowania odpowiadająca początkowej fazie eksploatacji jest następująca:

$$U(x) = \begin{cases} U_{g_4} & \text{gdy } g_4 = 0, \quad x \in [0,0 \div 0,9519], \\ U_1 & \text{gdy } x \in [0,9519 \div 10,8870], \\ U_{g_4} & \text{gdy } g_4 = 0, \quad x \in [10,8870 \div 17,0354], \\ U_1 & \text{gdy } x \in [17,0354 \div 30,4622], \\ U_1 & \text{gdy } x \in [30,4622 \div 42,8454], \\ U_{g_4} & \text{gdy } g_4 = 0, \quad x \in [42,8454 \div 47,4280], \\ U_1 & \text{gdy } x \in [47,4280 \div 55,9]. \end{cases} \quad (6.8)$$

W rozważanym przypadku aktywne pozostają dwa ograniczenia: ograniczenie geometryczne na sterowanie  $U = U_1$  i ograniczenie naprężeń ściskających  $g_4 = 0$ . Stosownie do tego mnożnik Lagrang'a  $\mu_4 \neq 0$  w przedziale aktywności ograniczeń. Rozwiązanie optymalne wynika tylko z ograniczeń, a odpowiadająca objętość wynosi 257,0923 (Rys.5.60).

Struktura sterowania w przypadku eksploatacji w czasie  $t > 1800$  dni:

$$U(x) = \begin{cases} U_{g_4} & \text{gdy } g_4 = 0, \quad x \in [0, 0 \div 0, 9519], \\ U_1 & \text{gdy } x \in [0, 9519 \div 10, 8870], \\ U_{g_4} & \text{gdy } g_4 = 0, \quad x \in [10, 8870 \div 17, 0354], \\ U_1 & \text{gdy } x \in [17, 0354 \div 20, 5507], \\ U_{opt} & \text{gdy } H_U = 0, \quad x \in [20, 5507 \div 22, 8042], \quad g_2 = 0, x_{b1} = 22, 8042, \\ U_1 & \text{gdy } x \in [22, 8042 \div 27, 0591], \\ U_{g_4} & \text{gdy } g_4 = 0, \quad x \in [27, 0591 \div 30, 0], \\ U_2 & \text{gdy } x \in [30, 0 \div 31, 0611], \\ U_1 & \text{gdy } x \in [31, 0611 \div 33, 6179], \\ U_{opt} & \text{gdy } H_U = 0, \quad x \in [33, 6179 \div 41, 3491], \quad g_2 = 0, x_{b2} = 35, 8761, \\ U_1 & \text{gdy } x \in [41, 3491 \div 44, 3665], \\ U_{g_4} & \text{gdy } g_4 = 0, \quad x \in [44, 3665 \div 48, 9407], \quad x_{b3} = 47, 4280, \\ U_1 & \text{gdy } x \in [48, 9407 \div 55, 9]. \end{cases} \quad (6.9)$$

Funkcja celu ma wartość 271,6925 (Rys.5.61).

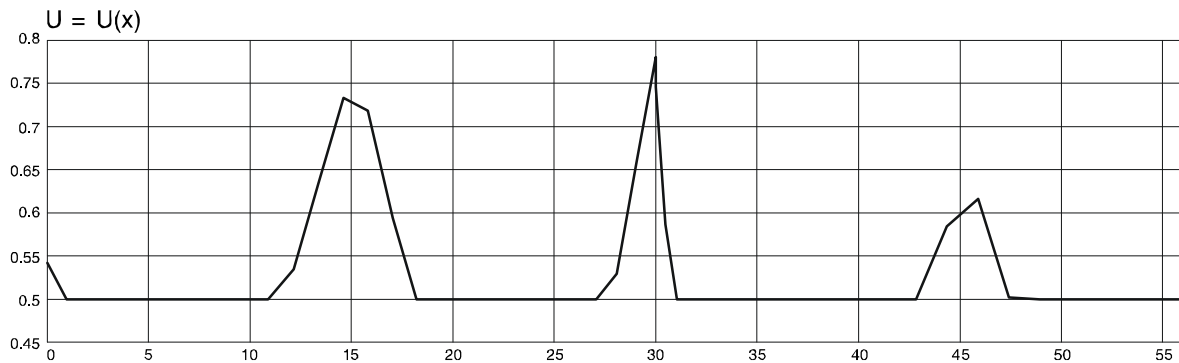
### 6.3 Porównanie uzyskanych rezultatów

Obecnie porównane zostaną wyniki optymalizacji dla dwóch analizowanych w pracy problemów. W zadaniu pierwszym (Rozdział 5) w optymalizacji uwzględniono obciążenia wynikające z etapów montażu łuku, montażu płyty pomostu, oraz eksploatacji. W zadaniu drugim uwzględniamy montaż płyty pomostu i eksploatację, zakładając, że łuk został wykonany na rusztowaniu stałym. W obu przypadkach porównywane są wyniki optymalizacji dla dwóch sytuacji obliczeniowych, które różnią się czasem eksploatacji. Prezentowane wyniki dotyczą czasu początkowego eksploatacji  $t_0$  i czasu po upływie 1800 dni.

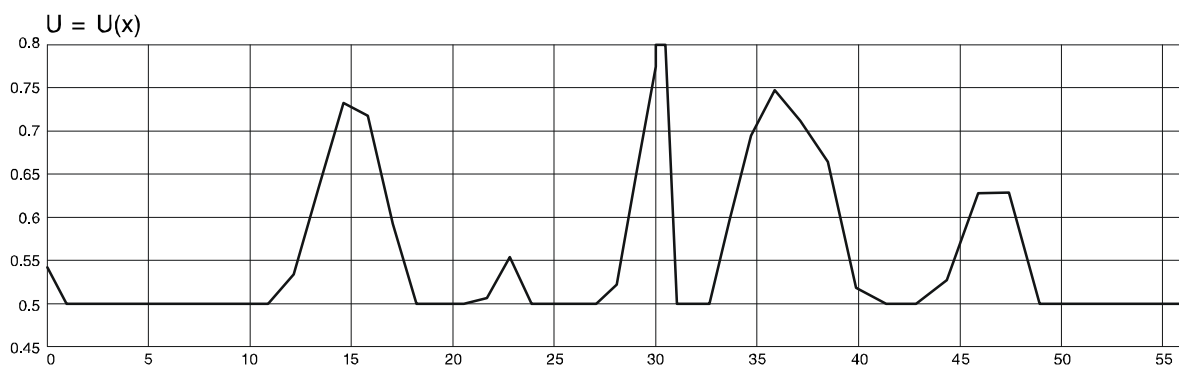
Tab. 6.2 Porównanie uzyskanych rezultatów

Rozwiązania optymalne	$t = t_0$	$t > 1800$ dni	odcinkowo-stałe
Montaż łuku, pomostu, eksploatacja	$y_{97} = 257, 5681$	$y_{97} = 276, 8625$	$y_{97} = 330, 8024$
Montaż pomostu, eksploatacja	$y_{43} = 257, 0923$	$y_{43} = 271, 6925$	$y_{43} = 304, 8080$

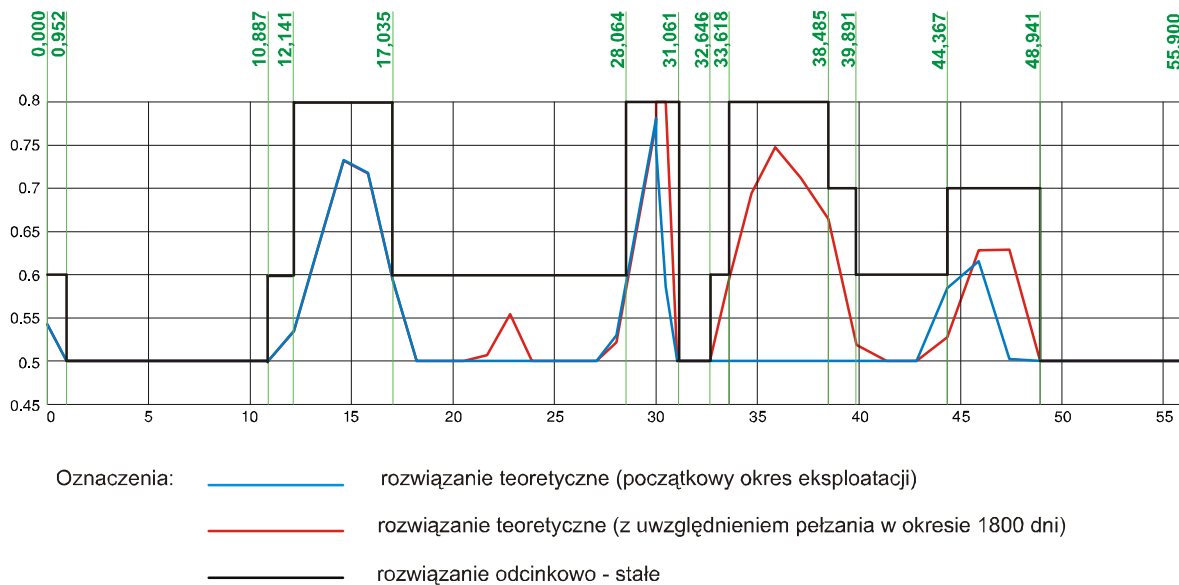
Uwzględnienie w problemie optymalizacji montażu łuku powoduje wzrost wartości funkcji celu (zużycia materiału), zwiększa się z tego powodu koszt realizacji. Dla całego łuku przy rozwiązaniu odcinkowo-ciągłym (Rys.5.62) zwiększenie zużycia betonu wynosi około  $60 m^3$ .



Rys. 5.60. Optymalna wysokość przekroju poprzecznego łuku, w przypadku betonowania na rusztowaniu pełnym, w początkowym okresie eksploatacji



Rys. 5.61. Optymalna wysokość przekroju poprzecznego łuku, w przypadku betonowania na rusztowaniu pełnym, w okresie eksploatacji powyżej 1800 dni



Rys. 5.62. Proponowana, odcinkowo-stała wysokość przekroju poprzecznego łuku, w przypadku betonowania na rusztowaniu pełnym

# Rozdział 7

## Zakończenie

Sformułowany w pracy cel jakim był dobór optymalnego przekroju poprzecznego łuku dla różnych stanów obciążenia został osiągnięty. Złożony problem optymalnego kształtowania łuku z uwzględnieniem: stanów montażowych łuku, stanu montażu płyty pomostu, stanu eksploatacji został sformułowany w kategoriach teorii sterowania i rozwiązany konsekwentnie przy zastosowaniu zasady minimum. Warunki konieczne optymalizacji zestawiono jako wielopunktowy problem brzegowy dla układu równań różniczkowych, a szczegółowe rozwiązania uzyskano stosując program numeryczny `dircol-2.1`.

Wnioski:

1. Uzyskane w pracy rozwiązania optymalne minimalizujące przyjętą funkcję celu, którą jest objętość, spełniają warunki konieczne optymalizacji.
2. Rozwiązano numerycznie wielopunktowy problem brzegowy o znacznym wymiarze (360), pokazując szczegółowo strukturę rozwiązania optymalnego, wskazując jednocześnie na aktywność przyjętych ograniczeń.
3. Dzięki wykorzystaniu funkcji indykatorowej  $w$  możliwe stało się znaczne ograniczenie wymiaru WPPB (bez tego przyjęcia wymiar WPPB wynosi  $(16 \cdot 97 = 1552)$ ).
4. Ograniczenia w zadaniach optymalnego kształtowania zapisano stosując funkcję  $\max, \min$ . Takie sformułowanie pozwala uwzględnić rozważane stany montażowe i stan eksploatacji bez sprawdzania ograniczeń w każdym stanie oddzielnie. Zastosowanie tych funkcji zmniejszyło znacznie liczbę ograniczeń.
5. Na podstawie uzyskanych rozwiązań optymalnych zaproponowano rozwiązanie praktyczne odcinkowo stałe, które zawiera początkowy stan eksploatacji i stan po upływie 1800 dni, wykazując jednocześnie nieprzekroczenie SGN i SGU.
6. W modelu uwzględniono zjawiska reologiczne, zastosowano metodę zastępczego modułu sprężystości.



7. Uwzględnione w optymalizacji etapy montażu łuku nie wpływają istotnie na zwiększenie wartości funkcji celu. Wzrost ten jest większy przy realizacji rozwiązań odcinkowo-stałych.

Przedstawione i rozwiązane przykłady przekonują, że metody optymalnego sterowania mogą być z powodzeniem stosowane do optymalnego kształtowania złożonych obiektów z uwzględnieniem faz montażu, eksploatacji i złożoności przekroju (zespolony betonowo-betonowy).

# Literatura

- [1] Bryson A. E., Y.-C. Ho: *Applied Optimal Control*. Printing. (Hemisphere Publishing Corporation, New York 1975).
- [2] Brzoska Z., Kączkowski Z., Lipka J., Olesiak Z., Życzkowski M: *Strength of Structural Elements.*, edited by Michał Życzkowski, PWN, Warszawa, Elsevier Amsterdam-Oxford-New York- Tokyo 1991, ISBN 83-01-09134-7.
- [3] Büskens, C., Maurer, H.: *SQP-methods for solving optimal control problems with control and state constraints: adjointvariables, sensitivity analysis and real-time control*. Preprint 00-3 Schwerpunktprogramm der DFG:Echtzeit -Optimierung grosser Systeme (2000)
- [4] Bulirsch R: *Notwendige Bedingungen für unstetige Lösungen bei Variationsproblemen* Report 25/67, Deutsche Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt.
- [5] Bulirsch R.: *Die Mehrzielmethode zur numerischen Lösung von nichtlinearen Randwertproblemen und Aufgaben der optimalen Steuerung*, Technical Report R1.06, Carl-Cranz Gesellschaft e.V, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Oberpfaffenhofen, 1971.
- [6] Bulirsch R., F. Montrone, H. J. Pesch: *Abort Landing in the Presence of a Windshear as a Minimax Optimal Control Problem Part:1 Necessary Conditions*. Journal of Optimization Theory and Applications 70 pp. 1-23 (1991 A).
- [7] Bulirsch R., F. Montrone, H. J. Pesch: *Abort Landing in the Presence of a Windshear as a Minimax Optimal Control Problem Part:2 Multiple Shooting and Homotopy* . Journal of Optimization Theory and Applications 70 pp. 223-254 (1991 B).
- [8] Chernousko F. L., A. A. Lyubushin: *Method of successive approximations for optimal control problems (survey paper)*. Opt. Contr. Appl. and Meth. 3 (1982) 101-114.
- [9] Collatz, L.: *The Numerical Treatment of Differential Equations*, Berlin 1960.
- [10] Furtak K: *Wprowadzenie do projektowania mostów*, skrypt Politechniki Krakowskiej, Kraków 1999.

- [11] Gajewski A.: *Optymalne kształtowanie wytrzymałościowe w przypadku materiałów o nieliniowości fizycznej*, Zeszyty Naukowe PK Nr 5, 1975, 1- 160.
- [12] Gajewski A., Życzkowski M.: *Optymalne kształtowanie ustrojów prętowych przy warunkach stateczności*, Wybrane zagadnienia stateczności konstrukcji. ISBN 83-04-02408X 133-226, 1987.
- [13] Gajewski A., Życzkowski M.: *Optimal structural design under stability constraints*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht-Boston-London, 1988. ISBN 90-247-3612-9
- [14] Kugelmann B., O. Mihatsch, L. Mikulski, W. Schmidt: *Optimal Design of Elastic Arches in Combination with Bifurcation Theory*, Mathematisches Institut TU München, Schwerpunktprogramm DFG, Report No. 477, 1993.
- [15] Laskowski, H.: *Optymalne kształtowanie stalowo-betonowych dźwigarów zespolonych w kategoriach teorii sterowania*, Praca doktorska, WIL PK, 1-115, 2006, <http://bc.biblos.pk.edu.pl>
- [16] Laskowski, H., Mikulski, L.: *Optymalne kształtowanie stalowej ramy portalowej*. Inżynieria i Budownictwo, 681-684, 12/2005
- [17] Laskowski, H., Mikulski, L.: *Optymalne kształtowanie konstrukcji w kategoriach teorii sterowania na przykładzie belki zespolonej.*, Inżynieria i Budownictwo, 8/2005.
- [18] Laskowski H., Mikulski L.: *Optymalizacja dźwigara stalowego z ograniczeniami normowymi*, ZN PKoszalińskiej Nr.38, 118-127, 2006
- [19] Malanowski, K., Maurer, H.: *Sensitivity analysis for state constrained optimal control problems*. Preprint 98-4, Schwerpunktprogramm der DFG Echtzeit-Optimierung grosser Systeme (1998)
- [20] Maurer, H.: *On Optimale Steuerprozesse mit Zustandsbeschränkungen*. Habilitation Mathematisches Institut, Universität Würzburg (1976).
- [21] H. Maurer H., Mittelman H.D.: *The Non-Linear Beam via Optimal Control with Bounded State Variables*, Optimal Control Applications & Methods Vol. 12, 19-31, 1991.
- [22] Mikulski L.: *Gestaltoptimierung von elastischen Trägern bei Verzerrung der Bogenachse*, ZAMM Z. angew. Math. Mech. 71 (1991) 6, T 719-T 722.
- [23] Mikulski L.: *Optimale Gestaltung elastischer Stäbe mit Zustandsbeschränkungen*, ZAMM Z. angew. Math. Mech. 73 (1993) 6, T 788-T 792.
- [24] Mikulski L.: *The Compressive Bars with Bounded Displacement as the Task of Optimal Control*, Engng. Trans. 41, 2, 123-137, 1993.

- [25] Mikulski L., M. Słoński: *Zwichrzenie i optymalizacja belek cienkościennych o zmiennym przekroju poprzecznym* Czasopismo Techniczne 4B/1997 41-57.
- [26] Mikulski L.: *Optimierung der elastisch gebetteten Träger*, ZAMM Z. angew. Math. Mech. 78 (1998), S1019-S1020.
- [27] Mikulski, L.: *Optymalne kształtowanie sprężystych układów prętowych*. Monografia 259, Seria Inżynieria Lądowa, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 1999
- [28] Mikulski, L.: *Gestaltoptimierung von Bögen für verschiedene Belastungsfälle.*, PAMM, Proc. Appl. Math. Mech. **2**, 475-476, 2003.
- [29] Mikulski L.: *Control Structure in Optimization Problems of Bar Systems.*, Int. J. Appl. Math. Comput. Sci., 2004, Vol. 14, No. 4, 515-529.
- [30] Mikulski L.: *Teoria sterowania w problemach optymalizacji konstrukcji*, Zeszyty Naukowe Politechniki Koszalińskiej Nr.37, 81-88, 2005.
- [31] Pesch H.J.: *Real-Time Computation of Feedback Controls for Constrained Optimal Control Problems Part 1: Neighbouring Extremals*, Optimal Control Applications & Methods Vol. 10, 129-145, 1989.
- [32] Pesch H.J.: *Real-Time Computation of Feedback Controls for Constrained Optimal Control Problems Part 2: A Correction Method Based on Multiple Shooting*, Optimal Control Applications & Methods Vol. 10, 147-171, 1989.
- [33] Pontryagin L. S., V. B. Boltyanskii, V. Gamkrelidze, E. F. Mischenko: *Mathematische Theorie optimaler Prozesse*. (München, Wien:Oldenburg, 1964).
- [34] Rettig, U.: *Optimale und robust-optimale Steuerungen: Grundlagen, numerische Berechnung und Anwendung bei der semi-aktiven Kfz-Schwingungsdämpfung*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8, Nr 992, VDI Verlag, 2003
- [35] Schütz K. G.: *Untersuchung des gekoppelten Schwingungssystems Brücke-Fahrzeug-Tilger unter besonderer Berücksichtigung von Fahrbahnebenheiten* TUM Lehrstuhl für Stahlbau, Heft 24, 1987.
- [36] Stoer J, Bulirsch, R.: *Numerische Mathematik 2*, Springer-Verlag, 1990, ISBN 3-540-51482-1.
- [37] Stoer J, Bulirsch, R.: *Wstęp do analizy numerycznej*. PWN, Warszawa 1987, ISBN83-01-06505-2.
- [38] Stryk O. von: *Ein direktes Verfahren zur Bahnoptimierung von Luft- und Raumfahrzeugen unter Berücksichtigung von Beschränkungen*. ZAMM 71, 6 (1991) T705-T706.

- [39] Stryk O. von: *Numerische Lösung optimaler Steuerungsprobleme: Diskretisierung, Parameteroptimierung und Berechnung der adjungierten Variablen*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8, Nr. 441, Düsseldorf: VDI-Verlag 1995.
- [40] Stryk O. von: *User's Guide DIRCOL A Direct Collocation Method For The Numerical Solution Of Optimal Control Problems*. Technische Universität München, Zentrum Mathematik, Version 1.2 August 1997.
- [41] Szefer G., Mikulski, L.: *Optimal design of elastic arches with rectangular cross section*. SM Archives 10 (1985) 171-185.
- [42] Szefer G., Mikulski, L.: *Optimal design of elastic arches with I cross section*. Eng. Trans. 32, 4, 467-480, 1984.
- [43] Szefer G.: *Analiza wrażliwości i optymalizacja układów dynamicznych z rozłożonymi parametrami*. Mechanika-AGH. Tom1, Zeszyt 4, 1983.
- [44] Szefer G.: *Sensitivity and Optimal Control of Elastic Structures with Distributed Parameters* Lecture Notes in Control and Information Sciences, 95 Optimal Control, 109-121, 1986, ISBN 3-540-17900-3, Springer-Verlag.
- [45] Szefer G.: *Konzeption der adjungierten Gleichung in der Optimalen Steuerung elastischer Systeme*. TH Leipzig, Wissensch. Zeitsch. 1984, 3.
- [46] Szefer G.: *Optimierung und Stabilität elastischer Strukturen* Universität Stuttgart, Report 1985.
- [47] Szefer, G., Mikulski, L., Laskowski, H.: *Optimal vibration of active structures achieved by pendulum actuators*, WCSMO-6, Rio de Janeiro, 2005
- [48] Tarnowski, W.: *Modelowanie systemów*, Politechnika Koszalińska, ISBN 83-7365-052-0, 2004
- [49] PN-90/B-03200: *Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie*.
- [50] PN-B-03264:2002, *Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie*.
- [51] PN-85/S-10030, *Obiekty mostowe. Obciążenia*.
- [52] PN-91/S-10042, *Obiekty mostowe. Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Projektowanie*.

# Rozdział 8

## Dodatek - D1

Program fortranowski user.f

```
C =====
C
C   ZADANIE: OPTYMALIZACJA WIADUKTU DROGOWEGO
C   =====
C
C   Zadanie dotyczy optymalnego kształtowania przekroju poprzecznego
C   luków żelbetonowych, jako elementów nosnych wiaduktu drogowego.
C   W optymalizacji uwzględniono montaż luków, płyty oraz eksploata-
C   cję wiaduktu.
C
C
C   Fazy montażowe i opis uwzględnionych obciążeń
C   -----
C
C   Faza 1
C   Betonowanie segmentów 9, 10, 16:
C   - obciążenie ciężarem własnym łuków prefabrykowanych,
C   - obciążenie mieszanką w segmentach 9, 10, 16,
C   - obciążenie wiatrem w segmentach 9, 10, 16,
C   - ciężar rusztowania w punktach y8, y10, y15.
C
C   Faza 2
C   Betonowanie segmentów 8, 11, 15:
C   - obciążenie mieszanką w segmentach 8, 11, 15,
C   - obciążenie wiatrem w segmentach 8, 11, 15,
C   - ujemny ciężar odparowanej wody w segmentach 9, 10, 16,
C   - obciążenie technolog. ciągłe w segmentach 9, 10, 16,
C   - obciążenie technolog. skupione w punktach y8, y10, y15
C   - ciężar rusztowania w punktach y7, y11, y14,
C   - ujemny ciężar rusztowania w punktach y8, y10, y15.
C
C   Faza 3
C   betonowanie segmentów 7, 12, 14:
C   - obciążenie mieszanką w segmentach 7, 12, 14,
C   - obciążenie wiatrem w segmentach 7, 12, 14,
C   - ujemny ciężar odparowanej wody w segmentach 8, 11, 15,
C   - obciążenie technolog. ciągłe w segmentach 8, 11, 15,
C   - ujemne obciążenie technolog. ciągłe w segmentach 9, 10, 16,
C   - obciążenie technolog. skupione w punktach y7, y11, y14,
C   - ujemne obciążenie technolog. skupione w punktach y8, y10, y15,
C   - ciężar rusztowania w punktach y6, y12, y13,
C   - ujemny ciężar rusztowania w punktach y7, y11, y14.
C
C   Faza 4
C   betonowanie segmentów 6, 13:
C   - obciążenie mieszanką w segmentach 6, 13,
C   - obciążenie wiatrem w segmentach 6, 13,
C   - ujemny ciężar odparowanej wody w segmentach 7, 12, 14,
C   - obciążenie technolog. ciągłe w segmentach 7, 12, 14,
C   - ujemne obciążenie technolog. ciągłe w segmentach 8, 11, 15,
C   - obciążenie technolog. skupione w punktach y6, y12, y13,
C   - ujemne obciążenie technolog. skupione w punktach y7, y11, y14,
C   - ciężar rusztowania w punktach y5, y13,
C   - ujemny ciężar rusztowania w punktach y6, y12.
```

C  
C Faza 5  
C betonowanie segmentu 5:  
C - obciążenie mieszanką w segmencie 5,  
C - obciążenie wiatrem w segmencie 5,  
C - ujemny ciężar odparowanej wody w segmentach 6, 13,  
C - obciążenie technolog. ciągłe w segmencie 6,  
C - ujemne obciążenie technolog. ciągłe w segmentach 7, 12, 14,  
C - obciążenie technolog. skupione w punkcie y5,  
C - ujemne obciążenie technolog. skupione w punktach y6, y12, y13,  
C - ciężar rusztowania w punkcie y4,  
C - ujemny ciężar rusztowania w punktach y5, y13.  
C  
C Faza 6  
C betonowanie segmentu 4:  
C - obciążenie mieszanką w segmencie 4,  
C - obciążenie wiatrem w segmencie 4,  
C - ujemny ciężar odparowanej wody w segmencie 5,  
C - obciążenie technolog. ciągłe w segmencie 5,  
C - ujemne obciążenie technolog. ciągłe w segmencie 6,  
C - obciążenie technolog. skupione w punkcie y4,  
C - ujemne obciążenie technolog. skupione w punkcie y5,  
C - ciężar rusztowania w punkcie y3,  
C - ujemny ciężar rusztowania w punkcie y4.  
C  
C Faza 7  
C betonowanie segmentu 3:  
C - obciążenie mieszanką w segmencie 3,  
C - obciążenie wiatrem w segmencie 3,  
C - ujemny ciężar odparowanej wody w segmencie 4,  
C - obciążenie technolog. ciągłe w segmencie 4,  
C - ujemne obciążenie technolog. ciągłe w segmencie 5,  
C - obciążenie technolog. skupione w punkcie y3,  
C - ujemne obciążenie technolog. skupione w punkcie y4,  
C - ciężar rusztowania w punkcie y2,  
C - ujemny ciężar rusztowania w punkcie y3.  
C  
C Faza 8  
C betonowanie segmentu 2:  
C - obciążenie mieszanką w segmencie 2,  
C - obciążenie wiatrem w segmencie 2,  
C - ujemny ciężar odparowanej wody w segmencie 3,  
C - obciążenie technolog. ciągłe w segmencie 3,  
C - ujemne obciążenie technolog. ciągłe w segmencie 4,  
C - obciążenie technolog. skupione w punkcie y2,  
C - ujemne obciążenie technolog. skupione w punkcie y3,  
C - ciężar rusztowania w punkcie y1,  
C - ujemny ciężar rusztowania w punkcie y2.  
C  
C Faza 9  
C betonowanie segmentu 1:  
C - obciążenie mieszanką w segmencie 1,  
C - obciążenie wiatrem w segmencie 1,  
C - ujemny ciężar odparowanej wody w segmencie 2,  
C - obciążenie technolog. ciągłe w segmencie 2,



C - ujemne obciążenie technolog. ciągle w segmencie 3,  
 C - obciążenie technolog. skupione w punkcie y1,  
 C - ujemne obciążenie technolog. skupione w punkcie y2,  
 C - ciężar rusztowania w punkcie y0,  
 C - ujemny ciężar rusztowania w punkcie y1.  
 C  
 C Faza 10  
 C demontaż urządzeń w segmencie 1 i montaż płyty:  
 C - ujemny ciężar odparowanej wody w segmencie 1,  
 C - ujemne obciążenie technolog. ciągle w segmencie 2,  
 C - ujemne obciążenie technolog. skupione w punkcie y1,  
 C - ujemny ciężar rusztowania w punkcie y0.  
 C - obciążenie przekazywane na luk przez podpory stałe  
 C [i] w fazie montażu płyty pomostu,  
 C - obciążenie przekazywane na luk przez podpory montażowe,  
 C  
 C Faza eksploatacji - obciążenia stałe:  
 C - obciążenie przekazywane na luk przez podpory stałe  
 C wywołane ciężarami własnymi podpór stałych, płyty jezdnej  
 C oraz wyposażenia w fazie eksploatacji.  
 C  
 C Faza eksploatacji - obciążenia zmienne - stan K1:  
 C - obciążenie samochodami q i tłumem pieszych p w przęsłach  
 C płyty 1, 2, 4, 6, 8;  
 C - obciążenie K nad filarem drugim.  
 C  
 C Faza eksploatacji - obciążenia zmienne - stan K2:  
 C - obciążenie samochodami q i tłumem pieszych p w przęsłach  
 C płyty 1, 3, 4, 6, 8;  
 C - obciążenie K nad filarem czwartym.  
 C  
 C Faza eksploatacji - obciążenia zmienne - stan K3:  
 C - obciążenie samochodami q i tłumem pieszych p w przęsłach  
 C płyty 2, 4, 5, 7;  
 C - obciążenie K nad filarem piątym.  
 C  
 C Faza eksploatacji - obciążenia zmienne - stan K4:  
 C - obciążenie samochodami q i tłumem pieszych p w przęsłach  
 C płyty 1, 3, 5, 6, 8;  
 C - obciążenie K nad filarem szóstym.  
 C  
 C Faza eksploatacji - obciążenia zmienne - stan K5:  
 C - obciążenie samochodami q i tłumem pieszych p w przęsłach  
 C płyty 1, 3, 5, 7, 8;  
 C - obciążenie K nad filarem siódmym.  
 C  
 C  
 C Zmienne stanu  
 C -----  
 C  
 C w: X(1) X(7) X(13) X(19) X(25) X(31) X(37) X(43)  
 C X(49) X(55) X(61) X(67) X(73) X(79) X(85) X(91)  
 C  
 C f: X(2) X(8) X(14) X(20) X(26) X(32) X(38) X(44)  
 C X(50) X(56) X(62) X(68) X(74) X(80) X(86) X(92)



C  
C       W przypadku obciazen symetrycznych:  
C  
C       Schemat polowkowy (jak dla obiektu symetrycznego). Od lewej:  
C       - utwierdzenie z mozliwoscia pionowego przesuwu,  
C       - prawa polowa luku centralnego,  
C       - pelne utwierdzenie w miejscu polaczenia obu lukow,  
C       - luk skrajny prawy, polaczony sztywno z lukiem centralnym,  
C       - podpora przegubowa nieprzesuwna.  
C  
C       W przypadku obciazen niesymetrycznych:  
C  
C       j.w. lecz bez podpory w osi symetrii obiektu. W tym przypadku  
C       formuluje sie dodatkowe warunki puntowe w osi symetrii uwzgle-  
C       dniajace zwiazki, jakie zachodza pomiedzy zmiennymi stanu  
C       opisujacymi symetryczne wzgledem siebie sytuacje obliczeniowe.  
C  
C       Podczas wszystkich etapow montazowych ulegaja zmianie wlasnosci  
C       betonu, a tym samym charakterystyki geometryczne przekroju.  
C       Przekroj lukow jest analizowany jako zespolony betonowo-betonowy.  
C       Wlasnosci betonu zostaly uzaleznione od czasu, jaki uplynal do  
C       poczatku danej fazy betonowania. Za faze betonowania uwaza sie:  
C  
C       - ukladanie mieszanki betonowej,  
C       - czas twardnienia i dojrzewania, po ktorym sa mozliwe prace  
C       zwiazane z przygotowaniem betonowania nastepnego segmentu,  
C       - demontaz deskowania i innych urzadzen na zamontowanym odcinku,  
C       - montaz deskowania nastepnego segmentu.  
C  
C       Wprowadzono nastepujace oznaczenia:  
C  
C        $E_c[i]$  - modul Young'a betonu, ktorego czas dojrzewania odpowiada  
C       czasowi, jaki uplynal do chwili rozpoczecia i-tego cyklu  
C       betonowania;  
C        $A_c[i]$  - powierzchnia przekroju zespolonego, ktorego czas dojrze-  
C       wania odpowiada czasowi, jaki uplynal do chwili rozpo-  
C       czecia i-tego cyklu betonowania;  
C        $I_c[i]$  - moment bezwladnosci przekroju zespolonego, ktorego czas  
C       dojrzewania odpowiada czasowi, jaki uplynal do chwili  
C       rozpoczecia i-tego cyklu betonowania;  
C        $A[i]$  - powierzchnia przekroju zespolonego, jako funkcja czasu  
C       i zmiennej niezaleznej  $T$  odmierzanej wzdluz rzutu piono-  
C       wego;  
C        $I[i]$  - moment bezwladnosci przekroju zespolonego, jako funkcja  
C       czasu i zmiennej niezaleznej  $T$  odmierzanej wzdluz  
C       rzutu pionowego;  
C  
C       Wielkosci  $A[i]$  oraz  $I[i]$  sa obliczane w kazdym punkcie  $T$  wzdluz  
C       rzutu pionowego obiektu w kazdej fazie montazu z zastosowaniem  
C       funkcji skokowej  $w$ .  
C  
C  
C       Obciążenia  
C       -----

- qp - cieżar własny lukow prefabrykowanych odniesiony do osi luku;*
- qm - cieżar własny mieszanki betonowej odniesiony do osi luku (zależny od zmiennej decyzyjnej), przyłożony do betonowanego segmentu luku;*
- qw - cieżar własny odparowanej wody z mieszanki odniesiony do osi luku (zależny od zmiennej decyzyjnej), przyłożony do segmentu zabetonowanego w poprzedniej fazie, jako obciążenie odciążające;*
- qt - obciążenie technologiczne ciągle podczas betonowania odniesione do rzutu na os  $OX$ , działające nad segmentem zabetonowanym w poprzedniej fazie;*
- qt - j.w. lecz jako odciążające przyłożone do odcinka betonowanego przed poprzednia faza;*
- Pt - obciążenie technologiczne skupione podczas betonowania, przyłożone na koncu segmentu zabetonowanego w poprzedniej fazie;*
- Pt - j.w. lecz jako odciążające, przyłożone na początku segmentu zabetonowanego w poprzedniej fazie;*
- Pr - cieżar rusztowania (obciążenie skupione) działający na koncu betonowanego segmentu;*
- Pr - j.w. lecz jako odciążające, działający na początku betonowanego segmentu;*
- POn - nacisk filara  $n$  w stanie montażu płyty;*
- P0mn - nacisk podpory montażowej pomiędzy filarem  $m$  i  $n$ ;*
- PEn - nacisk filara  $n$  w stanie eksploatacji (obciążenia stałe);*
- Kmn - siła skupiona przekazywana na łuk w miejscu oparcia filara  $n$  w stanie  $Km$ ;*

#### *Sterowanie*

-----

*Wysokosc przekroju poprzecznego luku zelbetowego.*

#### *Ograniczenia*

-----

*G(1) - ograniczenie przemieszczenia pionowego osi teoretycznej*

C            łuku żelbetowego po zakończeniu montażu.  
 C        G(2) - ograniczenie przemieszczenia pionowego łuku żelbetowego  
 C            spowodowane obciążeniami stałymi płyty jezdnej.  
 C        G(3) - ograniczenie przemieszczenia pionowego łuku żelbetowego  
 C            spowodowane obciążeniami zmiennymi.  
 C        G(4) - ograniczenie naprężeń ściskających w górnych włóknach  
 C            łuku żelbetowego.  
 C        G(5) - ograniczenie naprężeń ściskających w dolnych włóknach  
 C            łuku żelbetowego.  
 C        G(6) - hipotetyczne naprężenia rozciągające w górnych włóknach  
 C            łuku żelbetowego.  
 C        G(7) - hipotetyczne naprężenia rozciągające w dolnych włóknach  
 C            łuku żelbetowego.

=====

**SUBROUTINE DIRCOM()**

=====

*WPROWADZENIE DANYCH I OBLICZENIA WSTĘPNE*

-----

*Ten podprogram umieszczony w programie głównym jako pierwszy  
 służy do wprowadzenia danych. Są w nim również obliczone  
 charakterystyki geometryczne przekroju, w których nie  
 występuje zmienna sterująca oraz pewne stałe wykorzystywane  
 w innych podprogramach oraz w programie głównym.*

-----

**IMPLICIT NONE**

**INTEGER I**

**DOUBLE PRECISION**

& Ea, Ec, Ga, Gc, Gm, Gw, fck, fcm, fd, fcd, fct, UGR1, UGR2,  
 & R1, R2, x1, x2, yc1, yc2, L1, L2, bp, hp, B, TOB, TC,  
 & qw, qt, Pt, Pr, y0, y1, y2, y3, y4, y5, y6, y7,  
 & y8, y9, y10, y11, y12, y13, y14, y15, y16, Y,  
 & gamg, gamt, gamr, gamw, gamm, game, P01, P02, P03, P04, P05,  
 & P054, P043, P032, P021, PE1, PE2, PE3, PE4, PE5, RH, BSC,  
 & K11, K12, K13, K14, K15, K21, K22, K23, K24, K25,  
 & K31, K32, K33, K34, K35, K41, K42, K43, K44, K45,  
 & K51, K52, K53, K54, K55

**DIMENSION Y(0:47)**

**COMMON /USRCOM/**

& Ea, Ec, Ga, Gc, Gm, Gw, fck, fcm, fd, fcd, fct, UGR1, UGR2,  
 & R1, R2, x1, x2, yc1, yc2, L1, L2, bp, hp, B, TOB, TC,  
 & qw, qt, Pt, Pr, y0, y1, y2, y3, y4, y5, y6, y7,  
 & y8, y9, y10, y11, y12, y13, y14, y15, y16, Y,

```
& gang, gamt, gamr, gamw, gamm, game, P01, P02, P03, P04, P05,
& P054, P043, P032, P021, PE1, PE2, PE3, PE4, PE5, RH, BSC,
& K11, K12, K13, K14, K15, K21, K22, K23, K24, K25,
& K31, K32, K33, K34, K35, K41, K42, K43, K44, K45,
& K51, K52, K53, K54, K55
```

C

C *Dane geometryczne*

C -----

```
R1=43.500D0      ! promien luku centralnego
R2=16.125D0      ! promien luku skrajnego
x1=0.000D0       ! wspolrzedna srodka krzywizny luku centralnego
yc1=-31.500D0    ! wspolrzedna srodka krzywizny luku centralnego
x2=45.588D0      ! wspolrzedna srodka krzywizny luku skrajnego
yc2=-4.125D0     ! wspolrzedna srodka krzywizny luku skrajnego
L1=60.000D0      ! rozpietosc luku centralnego
L2=25.900D0      ! rozpietosc luku skrajnego
bp=0.400D0       ! szerokosc przekroju luku prefabrykowanego
hp=0.500D0       ! wysokosc przekroju luku prefabrykowanego
B=7.400D0        ! szerokosc przekroju poprzecznego luku
UGR1=L1/1000     ! graniczne ugięcie luku centralnego
UGR2=L2/1000     ! graniczne ugięcie luku skrajnego
```

C

C *Podzial odpowiadajacy DATGIT*

C -----

```
OPEN(1,FILE='DATGIT1', STATUS='OLD')
DO 10, I=1,27
    READ(1,100)Y(I-1)
    Y(I-1)=Y(I-1)*L1/2
10 CONTINUE
DO 20, I=28,48
    READ(1,200)Y(I-1)
    Y(I-1)=L1/2+Y(I-1)*L2
20 CONTINUE
DO 30, I=0,47
    WRITE(*,*)Y(I)
30 CONTINUE
100 FORMAT(E15.8)
200 FORMAT(E15.8)
```

C

C *Dane materiałowe (beton B40)*

C -----

```
Ea=206.0D6       ! moduł Younga stali
Ec=36.4D6        ! moduł Younga bet. dla obc. krótkotrwałych
Ga=78.5D0        ! ciężar właściwy stali
Gc=27.000D0      ! ciężar właściwy zelbetu na kruszywie bazalt
Gm=28.000D0      ! ciężar właściwy mieszanki wraz ze zbrojeniem
Gw=10.000D0      ! ciężar właściwy wody
fd=195.0D3       ! granica plastyczności stali
fck=30.0D3       ! wytrzymałość charakter. betonu na sciskanie
fcm=38.0D3       ! średnia wytrzymałość betonu na sciskanie
fcd=25.6D3       ! wytrzymałość obliczeniowa betonu na sciskanie
fct=2.10D3       ! wytrzymałość obl. betonu na rozciąganie
                 ! rozciąganie
```

C

C *Dane obciążenia*

```

C -----
qt=4.0D0      ! obciazenie technologiczne ciagle
qw=6.0D0      ! obciazenie wiatrem
Pt=100.0D0    ! obciazenie technologiczne skupione
Pr=250.0D0    ! ciezar rusztowania przesuwnego

C
P05=2442.0D0  ! nacisk filara 5 w fazie montau plyty
P04=2444.0D0  ! nacisk filara 4 w fazie montau plyty
P03=2463.0D0  ! nacisk filara 3 w fazie montau plyty
P02=2206.0D0  ! nacisk filara 2 w fazie montau plyty
P01=0000.0D0  ! nacisk filara 1 w fazie montau plyty (nieznany)

C
PE5=3627.0D0  ! nacisk filara 5 w fazie eksploatacji
PE4=3590.0D0  ! nacisk filara 4 w fazie eksploatacji
PE3=3700.0D0  ! nacisk filara 3 w fazie eksploatacji
PE2=3693.0D0  ! nacisk filara 2 w fazie eksploatacji
PE1=0000.0D0  ! nacisk filara 1 w fazie eksploatacji (nieznany)

C
P054=2442.0D0 ! obc. pomiedzy fil. 5 i 4 w fazie montau plyty
P043=2436.0D0 ! obc. pomiedzy fil. 4 i 3 w fazie montau plyty
P032=2603.0D0 ! obc. pomiedzy fil. 3 i 2 w fazie montau plyty
P021=2179.0D0 ! obc. pomiedzy fil. 2 i 1 w fazie montau plyty

C
C Wspolczynniki obciazenia
C -----
gamt=1.5D0    ! wspolczynnik obciazenia technologicznego
gamw=1.3D0    ! wspolczynnik obciazenia wiatrem
gamr=1.2D0    ! wspolczynnik obciazenia rusztowaniem
gamg=1.2D0    ! wspolczynnik obciazenia ciezaem wlasnym
gamm=1.25D0   ! wsp. obc. w fazie montazu plyty pomostu
game=1.25D0   ! wsp. obc. w fazie eksploatacji

C
C Obciazenia i ciezaary wlasciwe obliczeniowe
C -----
Ga=gamg*Ga
Gc=gamg*Gc
Gm=gamg*Gm
Gw=gamg*Gw
qw=gamw*qw
qt=gamt*qt
Pt=gamt*Pt
Pr=gamr*Pr

C
P05=P05*game  ! nacisk filara 5 w fazie montazu plyty
P04=P04*game  ! nacisk filara 4 w fazie montazu plyty
P03=P03*game  ! nacisk filara 3 w fazie montazu plyty
P02=P02*game  ! nacisk filara 2 w fazie montazu plyty
P01=P01*game  ! nacisk filara 1 w fazie montazu plyty (nieznany)

C
PE5=PE5*game  ! nacisk filara 5 w fazie eksploatacji
PE4=PE4*game  ! nacisk filara 4 w fazie eksploatacji
PE3=PE3*game  ! nacisk filara 3 w fazie eksploatacji
PE2=PE2*game  ! nacisk filara 2 w fazie eksploatacji
PE1=PE1*game  ! nacisk filara 1 w fazie eksploatacji (nieznany)

C

```

P054=P054\*game ! obc. pomiedzy fil. 5 i 4 w fazie montazu plyty  
 P043=P043\*game ! obc. pomiedzy fil. 4 i 3 w fazie montazu plyty  
 P032=P032\*game ! obc. pomiedzy fil. 3 i 2 w fazie montazu plyty  
 P021=P021\*game ! obc. pomiedzy fil. 2 i 1 w fazie montazu plyty

C

K15=315.738D0 ! nacisk filara 5 w fazie K1  
 K14=312.678D0 ! nacisk filara 4 w fazie K1  
 K13=334.464D0 ! nacisk filara 3 w fazie K1  
 K12=255.937D0 ! nacisk filara 2 w fazie K1  
 K11=235.812D0 ! nacisk filara 1 w fazie K1

C

K25=258.622D0 ! nacisk filara 5 w fazie K2  
 K24=328.122D0 ! nacisk filara 4 w fazie K2  
 K23=330.362D0 ! nacisk filara 3 w fazie K2  
 K22=257.023D0 ! nacisk filara 2 w fazie K2  
 K21=235.572D0 ! nacisk filara 1 w fazie K2

C

K35=2002.845D0 ! nacisk filara 5 w fazie K3  
 K34=256.569D0 ! nacisk filara 4 w fazie K3  
 K33=329.423D0 ! nacisk filara 3 w fazie K3  
 K32=386.630D0 ! nacisk filara 2 w fazie K3  
 K31=-49.345D0 ! nacisk filara 1 w fazie K3

C

K45=258.622D0 ! nacisk filara 5 w fazie K4  
 K44=1998.158D0 ! nacisk filara 4 w fazie K4  
 K43=275.017D0 ! nacisk filara 3 w fazie K4  
 K42=271.827D0 ! nacisk filara 2 w fazie K4  
 K41=232.297D0 ! nacisk filara 1 w fazie K4

C

K55=315.738D0 ! nacisk filara 5 w fazie K5  
 K54=323.372D0 ! nacisk filara 4 w fazie K5  
 K53=288.917D0 ! nacisk filara 3 w fazie K5  
 K52=1957.407D0 ! nacisk filara 2 w fazie K5  
 K51=183.776D0 ! nacisk filara 1 w fazie K5

C

C

C *Współrzędne granic przedziałów betonowania*

C

-----  
 y0=0.000D0  
 y1=1.903D0  
 y2=5.787D0  
 y3=9.624D0  
 y4=13.383D0  
 y5=17.035D0  
 y6=20.551D0  
 y7=23.901D0  
 y8=27.059D0  
 y9=30.000D0  
 y10=31.791D0  
 y11=34.698D0  
 y12=38.485D0  
 y13=42.845D0  
 y14=47.428D0  
 y15=51.862D0  
 y16=55.900D0



```

C
C
C Pozostałe dane
C -----
C
C   TOB=14.0D0      ! wiek betonu (w dniach) w chwili obciazenia
C   TC=14.0D0      ! czas trwania (w dniach) jednego cyklu beton
C   RH=0.8D0       ! wilgotnosc wzgledna powietrza
C   BSC=5.0D0      ! wspolczynnik zalezny od rodzaju cementu
C
C   RETURN
C   END
C
C
C
C
C
C =====
C   SUBROUTINE USRSTV (IPHASE, NX, LU, TAU, X, U)
C =====
C
C   POCZĄTKOWE WARTOŚCI ZMIENNYCH STANU I STEROWANIA
C   -----
C
C   Ten podprogram zawiera wstępny przybliżony przebieg zmiennych
C   stanu i zmiennej sterującej, parametry sterowania oraz wstępne
C   przybliżone <zdarzenia> wprowadzone przez użytkownika.
C
C   Wartości argumentów w tym podprogramie zależą od wartości
C   parametru typu całkowitego IPHASE.
C
C
C   Gdy IPHASE > 0 to:
C   =====
C
C   Parametry WEJŚCIA:
C   -----
C   IPHASE - numer aktualnej fazy (liczba całkowita)
C           1 <= IPHASE <= M1
C   NX     - liczba zmiennych stanu (liczba całkowita)
C   LU     - liczba zmiennych sterujących
C   TAU    - czas (liczba rzeczywista)
C
C   (...)
C
C   Parametry WYJŚCIA:
C   -----
C   X      - wstępne przbliżenie zmiennych stanu w czasie TAU
C           (macierz liczb rzeczywistych)
C   U      - wstępne przybliżenie zmiennych strujących w czasie
C           TAU (macierz liczb rzeczywistych)
C
C   Gdy IPHASE = 0 to:
C   =====
C

```

```

C      Parametry WEJŚCIA:
C      -----
C      LU      - liczba <zdarzeń> (liczba całkowita)
C
C      Parametry WYJŚCIA:
C      -----
C      U      - wstępne przybliżenia <zdarzeń>
C              E(1), ..., E(M) (macierz liczb rzeczywistych)
C
C
C      Gdy IPHASE < 0 to:
C      =====
C
C      Parametry WEJŚCIA:
C      -----
C      LU      - liczba LP parametrów sterowania (liczba całkowita)
C
C      Parametry WYJŚCIA:
C      -----
C      U      - wstępne przybliżenie parametrów sterowania
C              P(1), ..., P(LP) (tablica liczb rzeczywistych)
C
C -----
C
C      IMPLICIT NONE
C      INTEGER IPHASE, NX, LU, IFAIL
C      DOUBLE PRECISION TAU, X(NX), U(LU)
C
C      IF (IPHASE .GT. 0) THEN
C
C          X(1)=-0.02D0      ! wstępne przybliżenie przemieszczenia normalnego
C          X(2)=0.0D0       ! wstępne przybliżenie kąta ugięcia
C          X(3)=1000.0D0    ! wstępne przybliżenie wartości momentu
C          X(4)=0.0D0       ! wstępne przybliżenie wartości siły poprzecznej
C          X(5)=0.0D0       ! wstępne przybliżenie przemieszczenia stycznego
C          X(6)=-4000.0D0   ! wstępne przybliżenie wartości siły podłużnej
C
C          X(7)=-0.02D0     ! wstępne przybliżenie przemieszczenia normalnego
C          X(8)=0.0D0       ! wstępne przybliżenie kąta ugięcia
C          X(9)=10.0D0      ! wstępne przybliżenie wartości momentu
C          X(10)=0.0D0      ! wstępne przybliżenie wartości siły poprzecznej
C          X(11)=0.0D0      ! wstępne przybliżenie przemieszczenia stycznego
C          X(12)=-40.0D0    ! wstępne przybliżenie wartości siły podłużnej
C
C          X(13)=-0.02D0    ! wstępne przybliżenie przemieszczenia normalnego
C          X(14)=0.0D0      ! wstępne przybliżenie kąta ugięcia
C          X(15)=10.0D0     ! wstępne przybliżenie wartości momentu
C          X(16)=0.0D0      ! wstępne przybliżenie wartości siły poprzecznej
C          X(17)=0.0D0      ! wstępne przybliżenie przemieszczenia stycznego
C          X(18)=-40.0D0    ! wstępne przybliżenie wartości siły podłużnej
C
C          X(19)=-0.02D0    ! wstępne przybliżenie przemieszczenia normalnego
C          X(20)=0.0D0      ! wstępne przybliżenie kąta ugięcia
C          X(21)=10.0D0     ! wstępne przybliżenie wartości momentu
C          X(22)=0.0D0      ! wstępne przybliżenie wartości siły poprzecznej

```

C

X(23)=0.D0 ! wstępne przybliżenie przemieszczenia stycznego  
X(24)=-40.D0 ! wstępne przybliżenie wartości siły podłużnej

C

X(25)=-0.02D0 ! wstępne przybliżenie przemieszczenia normalnego  
X(26)=0.0D0 ! wstępne przybliżenie kąta ugięcia  
X(27)=10.0D0 ! wstępne przybliżenie wartości momentu  
X(28)=0.D0 ! wstępne przybliżenie wartości siły poprzecznej  
X(29)=0.D0 ! wstępne przybliżenie przemieszczenia stycznego  
X(30)=-40.D0 ! wstępne przybliżenie wartości siły podłużnej

C

X(31)=-0.02D0 ! wstępne przybliżenie przemieszczenia normalnego  
X(32)=0.0D0 ! wstępne przybliżenie kąta ugięcia  
X(33)=10.0D0 ! wstępne przybliżenie wartości momentu  
X(34)=0.D0 ! wstępne przybliżenie wartości siły poprzecznej  
X(35)=0.D0 ! wstępne przybliżenie przemieszczenia stycznego  
X(36)=-40.D0 ! wstępne przybliżenie wartości siły podłużnej

C

X(37)=-0.02D0 ! wstępne przybliżenie przemieszczenia normalnego  
X(38)=0.0D0 ! wstępne przybliżenie kąta ugięcia  
X(39)=10.0D0 ! wstępne przybliżenie wartości momentu  
X(40)=0.D0 ! wstępne przybliżenie wartości siły poprzecznej  
X(41)=0.D0 ! wstępne przybliżenie przemieszczenia stycznego  
X(42)=-40.D0 ! wstępne przybliżenie wartości siły podłużnej

C

X(43)=-0.02D0 ! wstępne przybliżenie przemieszczenia normalnego  
X(44)=0.0D0 ! wstępne przybliżenie kąta ugięcia  
X(45)=10.0D0 ! wstępne przybliżenie wartości momentu  
X(46)=0.D0 ! wstępne przybliżenie wartości siły poprzecznej  
X(47)=0.D0 ! wstępne przybliżenie przemieszczenia stycznego  
X(48)=-40.D0 ! wstępne przybliżenie wartości siły podłużnej

C

X(49)=-0.02D0 ! wstępne przybliżenie przemieszczenia normalnego  
X(50)=0.0D0 ! wstępne przybliżenie kąta ugięcia  
X(51)=10.0D0 ! wstępne przybliżenie wartości momentu  
X(52)=0.D0 ! wstępne przybliżenie wartości siły poprzecznej  
X(53)=0.D0 ! wstępne przybliżenie przemieszczenia stycznego  
X(54)=-40.D0 ! wstępne przybliżenie wartości siły podłużnej

C

X(55)=-0.02D0 ! wstępne przybliżenie przemieszczenia normalnego  
X(56)=0.0D0 ! wstępne przybliżenie kąta ugięcia  
X(57)=10.0D0 ! wstępne przybliżenie wartości momentu  
X(58)=0.D0 ! wstępne przybliżenie wartości siły poprzecznej  
X(59)=0.D0 ! wstępne przybliżenie przemieszczenia stycznego  
X(60)=-40.D0 ! wstępne przybliżenie wartości siły podłużnej

C

X(61)=-0.02D0 ! wstępne przybliżenie przemieszczenia normalnego  
X(62)=0.0D0 ! wstępne przybliżenie kąta ugięcia  
X(63)=10.0D0 ! wstępne przybliżenie wartości momentu  
X(64)=0.D0 ! wstępne przybliżenie wartości siły poprzecznej  
X(65)=0.D0 ! wstępne przybliżenie przemieszczenia stycznego  
X(66)=-40.D0 ! wstępne przybliżenie wartości siły podłużnej

C

X(67)=-0.02D0 ! wstępne przybliżenie przemieszczenia normalnego  
X(68)=0.0D0 ! wstępne przybliżenie kąta ugięcia  
X(69)=10.0D0 ! wstępne przybliżenie wartości momentu

```

X(70)=0.D0      ! wstępne przybliżenie wartości siły poprzecznej
X(71)=-00.D0   ! wstępne przybliżenie przemieszczenia stycznego
X(72)=-40.D0   ! wstępne przybliżenie wartości siły podłużnej

```

C

```

X(73)=-0.02D0  ! wstępne przybliżenie przemieszczenia normalnego
X(74)=0.0D0    ! wstępne przybliżenie kąta ugięcia
X(75)=10.0D0   ! wstępne przybliżenie wartości momentu
X(76)=0.D0     ! wstępne przybliżenie wartości siły poprzecznej
X(77)=0.D0     ! wstępne przybliżenie przemieszczenia stycznego
X(78)=-40.D0   ! wstępne przybliżenie wartości siły podłużnej

```

C

```

X(79)=-0.02D0  ! wstępne przybliżenie przemieszczenia normalnego
X(80)=-0.0D0   ! wstępne przybliżenie kąta ugięcia
X(81)=-10.0D0  ! wstępne przybliżenie wartości momentu
X(82)=0.D0     ! wstępne przybliżenie wartości siły poprzecznej
X(83)=0.D0     ! wstępne przybliżenie przemieszczenia stycznego
X(84)=-40.D0   ! wstępne przybliżenie wartości siły podłużnej

```

C

```

X(85)=-0.02D0  ! wstępne przybliżenie przemieszczenia normalnego
X(86)=0.0D0    ! wstępne przybliżenie kąta ugięcia
X(87)=10.0D0   ! wstępne przybliżenie wartości momentu
X(88)=0.D0     ! wstępne przybliżenie wartości siły poprzecznej
X(89)=0.D0     ! wstępne przybliżenie przemieszczenia stycznego
X(90)=-40.D0   ! wstępne przybliżenie wartości siły podłużnej

```

C

```

X(91)=-0.02D0  ! wstępne przybliżenie przemieszczenia normalnego
X(92)=0.0D0    ! wstępne przybliżenie kąta ugięcia
X(93)=10.0D0   ! wstępne przybliżenie wartości momentu
X(94)=0.D0     ! wstępne przybliżenie wartości siły poprzecznej
X(95)=0.D0     ! wstępne przybliżenie przemieszczenia stycznego
X(96)=-40.D0   ! wstępne przybliżenie wartości siły podłużnej

```

C

```

X(97)=0.D0     ! wstępne przybliżenie objętości

```

C

```

U(1)=0.5D0     ! wstępne przybliżenie wysokości przekroju

```

C

```

ELSE IF (IPHASE .EQ. 0) THEN

```

C

```

U(1)=0.0D0     ! srodek łuku centralnego
U(2)=30.0D0    ! podpora pośrednia
U(3)=55.9D0    ! podpora skrajna

```

C

```

END IF
RETURN
END

```

C

C

C

C

C

```

=====
SUBROUTINE USROBJ (NR, NX, LU, LP, XL, UL, P, ENR, FOBJ,
&                 XR, UR, TF, IFAIL)
=====

```

C

C

C

WPROWADZENIE FUNKCJI CELU

```

C          -----
C
C      Ten podprogram wprowadza funkcję celu zadania sterowania
C      optymalnego typu Mayer'a.
C      Funkcja celu w wielofazowym programie przyjmuje postać
C       $F(E) = F1(E(1)) + F2(E(2)) + \dots + FM1(E(M1))$ 
C      będącą sumą funkcji  $F_i$ ,  $i = 1, \dots, M1$ , ( $M1 = M-1$ )
C      które zależą albo tylko od zmiennych stanu, parametrów
C      sterowania w początkowym i końcowym czasie albo od lewo-
C      i prawostronnych ograniczeń w punktach zmiany sterowania
C      ( $i=2, \dots, M-1$ ).
C
C      Przypadek problemu zawierającego tylko  $M1=1$  fazę
C      -----
C      <(i.e.  $M=2$ , nie ma punktów przełączenia)>
C      -----
C      Gdy  $NR = 1$  to:  $ENR =$  czas początkowy  $T0$ 
C                       $XL =$  wektor zmiennych stanu w czasie  $T0$ 
C                       $UL =$  wektor zmiennych sterujących w  $T0$ 
C                       $XR =$  wektor zmiennych stanu w  $TF$ 
C                       $UR =$  wektor zmiennych sterujących w  $TF$ 
C                       $TF =$  czas końcowy
C      Wartość funkcji celu jest definiowana przez (gdy  $M=2$ )
C       $F = F1(X(T0), U(T0), P, T0, X(TF), U(TF), TF)$ 
C
C      Przypadek problemu zawierającego  $M1=2$  fazy
C      -----
C      <(i.e.  $M=3$ , jeden punkt przełączenia)>
C      -----
C      Gdy  $NR = 1$  to:  $ENR =$  czas początkowy  $T0$ 
C                       $XL =$  wektor zmiennych stanu w czasie  $T0$ 
C                       $UL =$  wektor zmiennych sterujących w  $T0$ 
C                       $XR =$  wektor zmiennych stanu w  $TF$ 
C                       $UR =$  wektor zmiennych sterujących w  $TF$ 
C                       $TF =$  czas końcowy
C      Gdy  $NR = 2$  to:  $ENR =$  punkt przełączenia  $TS$ 
C                       $XL =$  wektor zmiennych stanu w  $TS-0$ 
C                       $UL =$  wektor zmiennych sterujących w  $TS-0$ 
C                      (lewostronna granica w  $TS$ )
C                       $XR =$  wektor zmiennych stanu w  $TS+0$ 
C                       $UR =$  wektor zmiennych sterujących w  $TS+0$ 
C                      (prawostronna granica w  $TS$ )
C                       $TF =$  czas końcowy
C      Wartość funkcji celu jest definiowana przez (gdy  $M=3$ )
C       $F = F1(X(T0), U(T0), P, T0, X(TF), U(TF), TF)$ 
C       $+ F2(X(TS-), U(TS-), P, TS, X(TS+), U(TS+))$ 
C
C      Parametry WEJŚCIA
C      -----
C       $NR$  - specyfikuje potrzebny komponent  $ENR(E(NR))$  sumy,
C           która definiuje funkcję celu
C           (integer,  $1 \leq NR \leq$  number  $M-1$  of events)
C       $NX$  - liczba zmiennych stanu (integer)
C       $LU$  - liczba zmiennych sterujących (integer)
C       $LP$  - liczba parametrów sterowania (integer)

```

```

C      XL      - gdy NR = 1:          XL = X(E(1)+) = X(T0+)
C                zmienna stanu w czasie początkowym (tablica real)
C      gdy NR = 2, ..., M-1: XL = X(E(NR)-)
C                lewostonna granica zmiennych stanu
C                w NR-tym <zdarzeniu> (tablica real)
C      UL      - gdy NR = 1:          UL = U(E(1)+) = U(T0+)
C                zmienna sterująca w czasie początkowym (tablica rea;)
C      gdy NR = 2, ..., M-1: UL = U(E(NR)-)
C                lewostronna granica zmiennej sterującej
C                w NR-tym <zdarzeniu> (tablica real)
C      P      - parametr sterowania (tablica real)
C      ENR     - NR-te <zdarzenie> E(NR) (real)
C                gdy NR = 1: ENR = T0, czas początkowy
C                gdy NR = 2, ..., M-1: ENR = E(NR), punkt przełączenia
C      XR      - gdy NR = 1:          XR = X(E(M)) = X(TF)
C                zmienna sterująca w czasie końcowym (tablica real)
C      gdy NR = 2, ..., M-1: XR = X(E(NR)+)
C                prawostronna granica zmiennej stanu
C                w NR-tym <zdarzeniu> (real array)
C      UR      - gdy NR = 1:          UR = U(E(M)) = U(TF)
C                zmienna sterująca w czasie końcowym (tablica real)
C      gdy NR = 2, ..., M-1: UR = U(E(NR)+)
C                prawostronna granica zmiennej stanu
C                w NR-tym <zdarzeniu> (real array)
C      TF      - czas końcowy (real)

```

Parametry WYJŚCIA

```

C      -----
C      FOBJ - obliczona wartość NR-th part FNR(E(NR)) sumy
C              definiującej funkcję celu

```

**IMPLICIT NONE**

**INTEGER NX, LU, LP, NR, IFAIL**

**DOUBLE PRECISION**

**&ENR, XL(NX), UL(LU), P(LP), FOBJ, XR(NX), UR(LU), TF**

**IF (NR .GT. 0) THEN**

**FOBJ = XR(97)**

**ELSE**

**FOBJ = 0.0D0**

**END IF**

**RETURN**

**END**

```

C =====
C SUBROUTINE USRDEQ (IPHASE, NX, LU, LP, X, U, P, T, F, IFAIL)
C =====

```

WPROWADZENIE RÓWNAŃ STANU

```

C          =====
C
C      Obliczenie prawych stron  $F$  równań różniczkowych
C       $DX/DT = F(X, U, P, T)$  w fazie numer  $IPHASE$ .
C      Przed równaniami stanu oblicza się pewne elementy występujące
C      w tych równaniach, które zależą od zmiennej sterującej.
C
C      Parametry WEJŚCIA
C      -----
C       $IPHASE$  - numer aktualnej fazy (integer)
C                1 <=  $IPHASE$  <=  $M1$ 
C       $NX$       - liczba zmiennych stanu (integer)
C       $LU$       - liczba zmiennych sterujących (integer)
C       $LP$       - liczba parametrów sterowania (integer)
C       $X$        - zmienna stanu w czasie  $T$  (tablica real)
C       $U$        - zmienna sterująca w czasie  $T$  (tablica real)
C       $P$        - parametr sterowania (tablica real)
C       $T$        - czas, w którym funkcje  $F$  powinny być obliczone
C
C      Parametry WYJŚCIA
C      -----
C       $F$        - wyliczone wartości prawych stron równań różniczkowych
C                w fazie  $IPHASE$  i czasie  $T$ 
C
C -----
C
C      IMPLICIT NONE
C
C      INTEGER  IPHASE, NX, LU, LP, IFAIL, TL, K, ID, IA
C
C      DOUBLE PRECISION
C      & Ea, Ec, Ga, Gc, Gm, Gw, fck, fcm, fd, fcd, fct, UGR1, UGR2,
C      & R1, R2, x1, x2, yc1, yc2, L1, L2, bp, hp, B, TOB, TC,
C      & qw, qt, Pt, Pr, y0, y1, y2, y3, y4, y5, y6, y7,
C      & y8, y9, y10, y11, y12, y13, y14, y15, y16, Y,
C      & gang, gamt, gamr, gamw, gamm, game, P01, P02, P03, P04, P05,
C      & P054, P043, P032, P021, PE1, PE2, PE3, PE4, PE5,
C      & p054n, p054p, p043n, p043p, p032n, p032p, p021n, p021p,
C      & p05n, p05p, p04n, p04p, p02n, p02p,
C      & pe5n, pe5p, pe4n, pe4p, pe2n, pe2p,
C      & RH, H0, OB, FIRH, BETOB, BEFCM, BEH, BE, FITOB, FITC,
C      & BDS, BSC, BRH, BAS, ECSD0, ECSD, ECSA0, ECSA,
C      & ESA1, ESA2, ESA3, ESA4, ESA5, ESA6, ESA7, ESA8, ESA9, ESA10,
C      & ESD1, ESD2, ESD3, ESD4, ESD5, ESD6, ESD7, ESD8, ESD9, ESD10,
C      & ES1, ES2, ES3, ES4, ES5, ES6, ES7, ES8, ES9, ES10, ES11,
C      & h1, h2, h3, h4, h5, h6, h7, h8, h9, ESA11, ESD11,
C      & S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9,
C      & K11, K12, K13, K14, K15, K21, K22, K23, K24, K25,
C      & K31, K32, K33, K34, K35, K41, K42, K43, K44, K45,
C      & K51, K52, K53, K54, K55
C
C      DOUBLE PRECISION
C      & w1, w2, w3, w4, w5, w6, w7, w8, w9, w10,
C      & w11, w12, w13, w14, w15, w16,
C      & ws0, ws1, ws2, ws3, ws4, ws5, ws6, ws7, ws8, ws9, ws10,

```

```

& ws11, ws12, ws13, ws14, ws15, WK2, WK4, WK5,
& A, Am, Ap, I, Ip, b1, b2,
& qpn1, qpn2, qpp1, qpp2, qmn1, qmn2, qmp1, qmp2,
& qhn1, qhn2, qhp1, qhp2, qtn1, qtn2, qtp1, qtp2,
& qwn1, qwn2, qwp1, qwp2,
& ptn, ptp, prn, prp, DELTA, T0,
& n1, n2, n3, n4, n5, n6, n7, n8, n9, n10, n11,
& p1, p2, p3, p4, p5, p6, p7, p8, p9, p10, p11,
& Ec1, Ec2, Ec3, Ec4, Ec5, Ec6, Ec7, Ec8, Ec9, Ecp, Ece,
& Ac1, Ac2, Ac3, Ac4, Ac5, Ac6, Ac7, Ac8, Ac9, Ac10,
& A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8, A9, A10, A11,
& Ic1, Ic2, Ic3, Ic4, Ic5, Ic6, Ic7, Ic8, Ic9, Ic10,
& I1, I2, I3, I4, I5, I6, I7, I8, I9, I10, I11,
& pk1n, pk2n, pk3n, pk4n, pk5n, pk1p, pk2p, pk3p, pk4p, pk5p

```

```

C
DOUBLE PRECISION X(NX), U(LU), P(LP), T, F(NX)

```

```

C
DIMENSION Y(0:47)
DIMENSION BE(10)
DIMENSION FITC(10)
DIMENSION BDS(9)
DIMENSION ECSD(9)
DIMENSION BAS(10)
DIMENSION ECSA(10)

```

```

C
COMMON /USRCOM/

```

```

& Ea, Ec, Ga, Gc, Gm, Gw, fck, fcm, fd, fcd, fct, UGR1, UGR2,
& R1, R2, x1, x2, yc1, yc2, L1, L2, bp, hp, B, TOB, TC,
& qw, qt, Pt, Pr, y0, y1, y2, y3, y4, y5, y6, y7,
& y8, y9, y10, y11, y12, y13, y14, y15, y16, Y,
& gang, gamt, gamr, gamw, gamm, game, P01, P02, P03, P04, P05,
& P054, P043, P032, P021, PE1, PE2, PE3, PE4, PE5, RH, BSC,
& K11, K12, K13, K14, K15, K21, K22, K23, K24, K25,
& K31, K32, K33, K34, K35, K41, K42, K43, K44, K45,
& K51, K52, K53, K54, K55

```

```

C
C Obliczenie wartosci funkcji indykatorowej
C -----

```

```

C
C Funkcja indykatorowa w jest zdefiniowana w przedziale (y[i-1],y[i])
C - domknietym z lewej strony. Poza tym przedziale W[i]=0. Funkcja ta
C bedzie zastosowana do zapisu odcinkowo stalego obciazenia w poszcze-
C golnych przedzialach betonowania.

```

```

C
IF (T .GE. y0 .AND. T .LE. y1) THEN
  w1=1
ELSE
  w1=0
END IF
IF (T .GE. y1 .AND. T .LE. y2) THEN
  w2=1
ELSE
  w2=0
END IF
IF (T .GE. y2 .AND. T .LE. y3) THEN

```



```
w3=1
ELSE
W3=0
END IF
IF (T .GE. y3 .AND. T .LE. y4) THEN
w4=1
ELSE
W4=0
END IF
IF (T .GE. y4 .AND. T .LE. y5) THEN
w5=1
ELSE
W5=0
END IF
IF (T .GE. y5 .AND. T .LE. y6) THEN
w6=1
ELSE
W6=0
END IF
IF (T .GE. y6 .AND. T .LE. y7) THEN
w7=1
ELSE
W7=0
END IF
IF (T .GE. y7 .AND. T .LE. y8) THEN
w8=1
ELSE
W8=0
END IF
IF (T .GE. y8 .AND. T .LE. y9) THEN
w9=1
ELSE
W9=0
END IF
IF (T .GE. y9 .AND. T .LE. y10) THEN
w10=1
ELSE
W10=0
END IF
IF (T .GE. y10 .AND. T .LE. y11) THEN
w11=1
ELSE
W11=0
END IF
IF (T .GE. y11 .AND. T .LE. y12) THEN
w12=1
ELSE
W12=0
END IF
IF (T .GE. y12 .AND. T .LE. y13) THEN
w13=1
ELSE
W13=0
END IF
IF (T .GE. y13 .AND. T .LE. y14) THEN
```

```
w14=1
ELSE
W14=0
END IF
IF (T .GE. y14 .AND. T .LE. y15) THEN
w15=1
ELSE
W15=0
END IF
IF (T .GE. y15) THEN
w16=1
ELSE
W16=0
END IF
```

C

C Funkcja indykatorowa WS[i]=1 w przedziale ograniczonym przez y[i]

C z lewej strony oraz współrzędna kolejnego punktu (wynikającego

C z aktualnego podziału łuku w procesie całkowania numerycznego)

C z prawej. Funkcja ta będzie wykorzystana do zapisu obciążenia

C skupionego, przedstawianego w programie jako obciążenie równo-

C miernie rozłożone na możliwie najkrótszym odcinku.

C

```
IF (T .GE. y0 .AND. T .LE. Y(1)) THEN
WS0=1
ELSE
WS0=0
END IF
IF (T .GE. y1 .AND. T .LE. Y(3)) THEN
WS1=1
ELSE
WS1=0
END IF
IF (T .GE. y2 .AND. T .LE. Y(6)) THEN
WS2=1
ELSE
WS2=0
END IF
IF (T .GE. y3 .AND. T .LE. Y(9)) THEN
WS3=1
ELSE
WS3=0
END IF
IF (T .GE. y4 .AND. T .LE. Y(12)) THEN
WS4=1
ELSE
WS4=0
END IF
IF (T .GE. y5 .AND. T .LE. Y(15)) THEN
WS5=1
ELSE
WS5=0
END IF
IF (T .GE. y6 .AND. T .LE. Y(18)) THEN
WS6=1
ELSE
```

```
    WS6=0
  END IF
  IF (T .GE. y7 .AND. T .LE. Y(21)) THEN
    WS7=1
  ELSE
    WS7=0
  END IF
  IF (T .GE. y8 .AND. T .LE. Y(24)) THEN
    WS8=1
  ELSE
    WS8=0
  END IF
  IF (T .GE. y9 .AND. T .LE. Y(27)) THEN
    WS9=1
  ELSE
    WS9=0
  END IF
  IF (T .GE. y10 .AND. T .LE. Y(30)) THEN
    WS10=1
  ELSE
    WS10=0
  END IF
  IF (T .GE. y11 .AND. T .LE. Y(33)) THEN
    WS11=1
  ELSE
    WS11=0
  END IF
  IF (T .GE. y12 .AND. T .LE. Y(36)) THEN
    WS12=1
  ELSE
    WS12=0
  END IF
  IF (T .GE. y13 .AND. T .LE. Y(39)) THEN
    WS13=1
  ELSE
    WS13=0
  END IF
  IF (T .GE. y14 .AND. T .LE. Y(42)) THEN
    WS14=1
  ELSE
    WS14=0
  END IF
  IF (T .GE. y15 .AND. T .LE. Y(45)) THEN
    WS15=1
  ELSE
    WS15=0
  END IF
```

C  
C Funkcje indykatorowe wk do opisu obciążeń skupionych wywołanych  
C obciążeniem pojazdem K, samochodami q i tłumem pieszych p  
C

```
  IF (T .LT. 0.951) THEN
    WK5=1
  ELSE
    WK5=0
```

END IF

C

IF (T .GT. 14.614 .AND. T .LT. 15.831) THEN

WK4=1

ELSE

WK4=0

END IF

C

IF (T .GT. 44.366 .AND. T .LT. 45.898) THEN

WK2=1

ELSE

WK2=0

END IF

C

C Przeliczenie obciazen skupionych na ciagle, na najkrotszym mozliwym  
C odcinku DELTA wynikajacym z wielkosci siatki w miejscu dzialania  
C obciazenia. Obciazenia stycznne i normalne

C

IF (T .GE. y(0) .AND. T .LE. Y(1)) THEN

DELTA=y(1)-y(0)

p05n=0.5\*P05/DELTA\*T\*SQRT(R1\*\*2-T\*\*2)/R1\*\*2

p05p=0.5\*P05/DELTA\*(R1\*\*2-T\*\*2)/R1\*\*2

pe5n=0.5\*PE5/DELTA\*T\*SQRT(R1\*\*2-T\*\*2)/R1\*\*2

pe5p=0.5\*PE5/DELTA\*(R1\*\*2-T\*\*2)/R1\*\*2

ELSE

p05n=0.

p05p=0.

pe5n=0.

pe5p=0.

END IF

IF (T .GE. y(12) .AND. T .LE. Y(13)) THEN

DELTA=y(13)-y(12)

p04n=P04/DELTA\*T\*SQRT(R1\*\*2-T\*\*2)/R1\*\*2

p04p=P04/DELTA\*(R1\*\*2-T\*\*2)/R1\*\*2

pe4n=PE4/DELTA\*T\*SQRT(R1\*\*2-T\*\*2)/R1\*\*2

pe4p=PE4/DELTA\*(R1\*\*2-T\*\*2)/R1\*\*2

ELSE

p04n=0.

p04p=0.

pe4n=0.

pe4p=0.

END IF

IF (T .GE. y(39) .AND. T .LE. Y(40)) THEN

DELTA=y(40)-y(39)

p02n=P02/DELTA\*(T-x2)\*SQRT(R2\*\*2-(T-x2)\*\*2)/R2\*\*2

p02p=P02/DELTA\*(R2\*\*2-(T-x2)\*\*2)/R2\*\*2

pe2n=Pe2/DELTA\*(T-x2)\*SQRT(R2\*\*2-(T-x2)\*\*2)/R2\*\*2

pe2p=Pe2/DELTA\*(R2\*\*2-(T-x2)\*\*2)/R2\*\*2

ELSE

p02n=0.

p02p=0.

pe2n=0.

pe2p=0.

END IF

IF (T .GE. y(6) .AND. T .LE. Y(7)) THEN

```

    DELTA=y(7)-y(6)
    p054n=P054/DELTA*T*SQRT(R1**2-T**2)/R1**2
    p054p=P054/DELTA*(R1**2-T**2)/R1**2
ELSE
    p054n=0.
    p054p=0.
END IF
IF (T .GE. y(18) .AND. T .LE. Y(19)) THEN
    DELTA=y(19)-y(18)
    p043n=P043/DELTA*T*SQRT(R1**2-T**2)/R1**2
    p043p=P043/DELTA*(R1**2-T**2)/R1**2
ELSE
    p043n=0.
    p043p=0.
END IF
IF (T .GE. y(34) .AND. T .LE. Y(35)) THEN
    DELTA=y(35)-y(34)
    p032n=P032/DELTA*(T-x2)*SQRT(R2**2-(T-x2)**2)/R2**2
    p032p=P032/DELTA*(R2**2-(T-x2)**2)/R2**2
ELSE
    p032n=0.
    p032p=0.
END IF
IF (T .GE. y(43) .AND. T .LE. Y(44)) THEN
    DELTA=y(44)-y(43)
    p021n=P021/DELTA*(T-x2)*SQRT(R2**2-(T-x2)**2)/R2**2
    p021p=P021/DELTA*(R2**2-(T-x2)**2)/R2**2
ELSE
    p021n=0.
    p021p=0.
END IF
C
C
C Wspolczynniki pomocnicze zabezpieczajace przed wystepowaniem
C wartosci ujemnych pod pierwiastkiem w zaleznosciach obowiazu-
C jacych w innym przedziale charakterystycznym niz rozwazany
C w danej chwili obliczen
C
    b1=(w1+w2+w3+w4+w5+w6+w7+w8+w9)
    b2=(w10+w11+w12+w13+w14+w15+w16)
C
C Powierzchnie elementow przekorju poprzecznego
C
    A=B*U(1)           ! pole przekroju betonowego calkowite
    Ap=4*bp*hp        ! pole przekroju lukow prefabrykowanych
    Am= A-Ap          ! pole przekroju swiezego betonu
C
C
C Wspolczynnik pelzania betonu
C -----
C
C Wspolczynnik pelzania betonu obliczono na podstawie normy
C PN-B-03264:2002.
C
C TOB   - czas (w dniach) obciazenia betonu liczony od dnia

```

```

C      betonowania. Zalożono, że każdy segment jest obciążony
C      (rozszałowany) po czasie TOB od dnia betonowania;
C TC    - czas trwania jednego cyklu betonowania;
C RH    - wilgotność względna powietrza (liczba od 0,0 do 1,0);
C HO    - miarodajny wymiar przekroju [mm];
C OB    - obwód przekroju, który ma kontakt z powietrzem [m];
C FIRH  - funkcja empiryczna (PN: A3a, A3b);
C BETOB - funkcja empiryczna (PN: A5);
C BEFCM - funkcja empiryczna (PN: A.4);
C BEH   - funkcja empiryczna (PN: A.8);
C BE[I] - funkcja empiryczna dla betonu po czasie I*TC od chwili
C        obciążenia (PN: A.7);
C FITOB - współczynnik końcowy pęcznienia betonu obciążonego
C        po czasie TOB od dnia betonowania (PN: A.2);
C FITC[I]- współczynnik pęcznienia betonu po czasie I*TC od chwili
C        obciążenia (PN: A.1);
C
C      OB=2*B+2*U(1)-4*bp
C      HO=2*Am*1000/OB
C      IF (fcm .LE. 35.0E3) THEN
C          FIRH=1+(1-RH)/(0.1*HO**(1./3))
C      ELSE
C          FIRH=(1+(1-RH)*(35000/fcm)**0.7/(0.1*HO**(1./3)))*
C      &      (35000/fcm)**0.2
C      END IF
C      BETOB=1/(0.1+TOB**0.2)
C      BEFCM=16.8/SQRT(fcm/1000)
C      FITOB=FIRH*BETOB*BEFCM
C      BEH=1.5*(1+(1.2*RH)**18)*HO+250.0
C      IF (BEH .GT. 1500) THEN
C          BEH=1500
C      END IF
C      DO 5, K=1,10
C          BE(K)=(K*TC/(BEH+K*TC))**0.3
C          FITC(K)=FITOB*BE(K)
5      END DO
C
C      Skurcz betonu wg PN-B-03264:2002
C      -----
C
C      Zalożono, że beton jest intensywnie pielęgnowany przez czas
C      trwania jednego cyklu. Po tym czasie następuje wysychanie betonu
C      i rozpoczyna się skurcz od wysychania. Skurcz autogeniczny rozpoczyna
C      się z chwili ułożenia mieszanki betonowej. Dla uproszczenia obliczeń,
C      przyjęto jednorodny przekrój łuku w ustalonym punkcie osi.
C
C      BDS(ID)    - funkcja określająca przyrost skurczu w czasie (B.5)
C      BSC        - wsp. zależny od rodzaju cementu (B.3)
C      BRH        - wsp. zależny od wilgotności względnej pow. (B.4)
C      ECSDO      - końcowe odkształcenie skurczu od wysychania (B.2)
C      ECSD(ID)   - skurcz od wysychania (B.1)
C      ECSAO      - końcowe odkształcenie skurczu autogenicznego (B.7)
C      BAS(IA)    - funkcja określająca przyrost skurczu autogen. (B.8)
C      ECSA(IA)   - skurcz autogeniczny (B.6)
C      ECS        - skurcz całkowity

```

C ID - wielokrotnosc cykli betonowania, w trakcie ktorych  
 C ma miejsce skurcz od wysychania  
 C IA - wielokrotnosc cykli betonowania, w trakcie ktorych  
 C ma miejsce skurcz autogeniczny  
 C

DO 6, ID=1,9

BDS(ID)=SQRT(ID\*TC/(0.035\*H0\*\*2+ID\*TC))

6 END DO

BSC=5. ! dla cementow zwyklych i szybkotwardniejacych

BRH=1.55\*(1-RH\*\*3)

c ECSD0=(160.+BSC\*(90.-fcm/1000))\*BRH\*1.0E-6

ECSD0=0.

DO 7, ID=1,9

ECSD(ID)=ECSD0\*BDS(ID)

7 END DO

c ECSA0=2.5\*(fck/1000-10.0)\*1.0E-6

ECSA0=0.

DO 8, IA=1,10

BAS(IA)=1-EXP(-0.2\*SQRT(IA\*TC))

8 END DO

DO 9, IA=1,10

ECSA(IA)=ECSA0\*BAS(IA)

9 END DO

C

C

c Skurcz betonu calego obiektu w poszczegolnych fazach betonowania

C -----

C

c Skurcz od wysychania:

C

ESD1=0.

ESD2=ECSD(1)\*(W9+W10+W16)

ESD3=(ECSD(2)-ECSD(1))\*(W9+W10+W16)+ECSD(1)\*(W8+W11+W15)

ESD4=(ECSD(3)-ECSD(2))\*(W9+W10+W16)+(ECSD(2)-ECSD(1))\*

& (W8+W11+W15)+ECSD(1)\*(W7+W12+W14)

ESD5=(ECSD(4)-ECSD(3))\*(W9+W10+W16)+(ECSD(3)-ECSD(2))\*

& (W8+W11+W15)+(ECSD(2)-ECSD(1))\*(W7+W12+W14)+

& ECSD(1)\*(W6+W13)

ESD6=(ECSD(5)-ECSD(4))\*(W9+W10+W16)+(ECSD(4)-ECSD(3))\*

& (W8+W11+W15)+(ECSD(3)-ECSD(2))\*(W7+W12+W14)+

& (ECSD(2)-ECSD(1))\*(W6+W13)+ECSD(1)\*W5

ESD7=(ECSD(6)-ECSD(5))\*(W9+W10+W16)+(ECSD(5)-ECSD(4))\*

& (W8+W11+W15)+(ECSD(4)-ECSD(3))\*(W7+W12+W14)+

& (ECSD(3)-ECSD(2))\*(W6+W13)+(ECSD(2)-ECSD(1))\*W5+ECSD(1)\*W4

ESD8=(ECSD(7)-ECSD(6))\*(W9+W10+W16)+(ECSD(6)-ECSD(5))\*

& (W8+W11+W15)+(ECSD(5)-ECSD(4))\*(W7+W12+W14)+

& (ECSD(4)-ECSD(3))\*(W6+W13)+(ECSD(3)-ECSD(2))\*W5+

& (ECSD(2)-ECSD(1))\*W4+ECSD(1)\*W3

ESD9=(ECSD(8)-ECSD(7))\*(W9+W10+W16)+(ECSD(7)-ECSD(6))\*

& (W8+W11+W15)+(ECSD(6)-ECSD(5))\*(W7+W12+W14)+

& (ECSD(5)-ECSD(4))\*(W6+W13)+(ECSD(4)-ECSD(3))\*W5+

& (ECSD(3)-ECSD(2))\*W4+(ECSD(2)-ECSD(1))\*W3+ECSD(1)\*W2

ESD10=(ECSD(9)-ECSD(8))\*(W9+W10+W16)+(ECSD(8)-ECSD(7))\*

& (W8+W11+W15)+(ECSD(7)-ECSD(6))\*(W7+W12+W14)+

& (ECSD(6)-ECSD(5))\*(W6+W13)+(ECSD(5)-ECSD(4))\*W5+

& (ECSD(4)-ECSD(3))\*W4+(ECSD(3)-ECSD(2))\*W3+  
 & (ECSD(2)-ECSD(1))\*W2+ECSD(1)\*W1

C  
 ESD11=(ECSD0-ECSD(9))\*(W9+W10+W16)+(ECSD0-ECSD(8))\*  
 & (W8+W11+W15)+(ECSD0-ECSD(7))\*(W7+W12+W14)+  
 & (ECSD0-ECSD(6))\*(W6+W13)+(ECSD0-ECSD(5))\*W5+  
 & (ECSD0-ECSD(4))\*W4+(ECSD0-ECSD(3))\*W3+  
 & (ECSD0-ECSD(2))\*W2+(ECSD0-ECSD(1))\*W1

C  
 C Skurcz autogeniczny:  
 C

ESA1=ECSA(1)\*(W9+W10+W16)  
 ESA2=(ECSA(2)-ECSA(1))\*(W9+W10+W16)+ECSA(1)\*(W8+W11+W15)  
 ESA3=(ECSA(3)-ECSA(2))\*(W9+W10+W16)+(ECSA(2)-ECSA(1))\*  
 & (W8+W11+W15)+ECSA(1)\*(W7+W12+W14)  
 ESA4=(ECSA(4)-ECSA(3))\*(W9+W10+W16)+(ECSA(3)-ECSA(2))\*  
 & (W8+W11+W15)+(ECSA(2)-ECSA(1))\*(W7+W12+W14)+  
 & ECSA(1)\*(W6+W13)  
 ESA5=(ECSA(5)-ECSA(4))\*(W9+W10+W16)+(ECSA(4)-ECSA(3))\*  
 & (W8+W11+W15)+(ECSA(3)-ECSA(2))\*(W7+W12+W14)+  
 & (ECSA(2)-ECSA(1))\*(W6+W13)+ECSA(1)\*W5  
 ESA6=(ECSA(6)-ECSA(5))\*(W9+W10+W16)+(ECSA(5)-ECSA(4))\*  
 & (W8+W11+W15)+(ECSA(4)-ECSA(3))\*(W7+W12+W14)+  
 & (ECSA(3)-ECSA(2))\*(W6+W13)+(ECSA(2)-ECSA(1))\*W5+ECSA(1)\*W4  
 ESA7=(ECSA(7)-ECSA(6))\*(W9+W10+W16)+(ECSA(6)-ECSA(5))\*  
 & (W8+W11+W15)+(ECSA(5)-ECSA(4))\*(W7+W12+W14)+  
 & (ECSA(4)-ECSA(3))\*(W6+W13)+(ECSA(3)-ECSA(2))\*W5+  
 & (ECSA(2)-ECSA(1))\*W4+ECSA(1)\*W3  
 ESA8=(ECSA(8)-ECSA(7))\*(W9+W10+W16)+(ECSA(7)-ECSA(6))\*  
 & (W8+W11+W15)+(ECSA(6)-ECSA(5))\*(W7+W12+W14)+  
 & (ECSA(5)-ECSA(4))\*(W6+W13)+(ECSA(4)-ECSA(3))\*W5+  
 & (ECSA(3)-ECSA(2))\*W4+(ECSA(2)-ECSA(1))\*W3+ECSA(1)\*W2  
 ESA9=(ECSA(9)-ECSA(8))\*(W9+W10+W16)+(ECSA(8)-ECSA(7))\*  
 & (W8+W11+W15)+(ECSA(7)-ECSA(6))\*(W7+W12+W14)+  
 & (ECSA(6)-ECSA(5))\*(W6+W13)+(ECSA(5)-ECSA(4))\*W5+  
 & (ECSA(4)-ECSA(3))\*W4+(ECSA(3)-ECSA(2))\*W3+  
 & (ECSA(2)-ECSA(1))\*W2+ECSA(1)\*W1  
 ESA10=(ECSA(10)-ECSA(9))\*(W9+W10+W16)+(ECSA(9)-ECSA(8))\*  
 & (W8+W11+W15)+(ECSA(8)-ECSA(7))\*(W7+W12+W14)+  
 & (ECSA(7)-ECSA(6))\*(W6+W13)+(ECSA(6)-ECSA(5))\*W5+  
 & (ECSA(5)-ECSA(4))\*W4+(ECSA(4)-ECSA(3))\*W3+  
 & (ECSA(3)-ECSA(2))\*W2+(ECSA(2)-ECSA(1))\*W1

C  
 ESA11=(ECSA0-ECSA(10))\*(W9+W10+W16)+(ECSA0-ECSA(9))\*  
 & (W8+W11+W15)+(ECSA0-ECSA(8))\*(W7+W12+W14)+  
 & (ECSA0-ECSA(7))\*(W6+W13)+(ECSA0-ECSA(6))\*W5+  
 & (ECSA0-ECSA(5))\*W4+(ECSA0-ECSA(4))\*W3+  
 & (ECSA0-ECSA(3))\*W2+(ECSA0-ECSA(2))\*W1

C  
 C Skurcz całkowity:  
 C

ES1=ESD1+ESA1  
 ES2=ESD2+ESA2  
 ES3=ESD3+ESA3  
 ES4=ESD4+ESA4



ES5=ESD5+ESA5  
 ES6=ESD6+ESA6  
 ES7=ESD7+ESA7  
 ES8=ESD8+ESA8  
 ES9=ESD9+ESA9  
 ES10=ESD10+ESA10  
 ES11=ESD11+ESA11

C  
 C  
 C  
 C  
 C

*Modul Young'a betonu w fazie montazu plyty pomostu*

-----

$E_{cp} = E_c / (1 + FITC(10))$  ! modul Younga betonu prefabrykatow  
 ! w fazie montazu plyty pomostu  
 $E_{c1} = E_c / (1 + FITC(9))$  ! modul Younga betonu ulozonego  
 ! w pierwszej fazie betonowania  
 $E_{c2} = E_c / (1 + FITC(8))$  ! j. w. lecz w 2 fazie betonowania  
 $E_{c3} = E_c / (1 + FITC(7))$  ! j. w. lecz w 3 fazie betonowania  
 $E_{c4} = E_c / (1 + FITC(6))$  ! j. w. lecz w 4 fazie betonowania  
 $E_{c5} = E_c / (1 + FITC(5))$  ! j. w. lecz w 5 fazie betonowania  
 $E_{c6} = E_c / (1 + FITC(4))$  ! j. w. lecz w 6 fazie betonowania  
 $E_{c7} = E_c / (1 + FITC(3))$  ! j. w. lecz w 7 fazie betonowania  
 $E_{c8} = E_c / (1 + FITC(2))$  ! j. w. lecz w 8 fazie betonowania  
 $E_{c9} = E_c / (1 + FITC(1))$  ! j. w. lecz w 9 fazie betonowania

C  
 C  
 C  
 C  
 C

*Modul Young'a betonu w fazie eksploatacji powyzej 1800 dni*

-----

$E_{ce} = E_c / (1 + FITOB)$

C  
 C  
 C  
 C  
 C

*Sprowadzone pole powierzchni przekroju zespolonego*

-----

$A_{c1} = A_p + (E_{c1} / E_{cp}) * A_m$  ! sprowadzone pole powierzchni przekroju  
 ! segmentow betonowanych w fazie 1  
 $A_{c2} = A_p + (E_{c2} / E_{cp}) * A_m$  ! j. w. lecz betonowanych w fazie 2  
 $A_{c3} = A_p + (E_{c3} / E_{cp}) * A_m$  ! j. w. lecz betonowanych w fazie 3  
 $A_{c4} = A_p + (E_{c4} / E_{cp}) * A_m$  ! j. w. lecz betonowanych w fazie 4  
 $A_{c5} = A_p + (E_{c5} / E_{cp}) * A_m$  ! j. w. lecz betonowanych w fazie 5  
 $A_{c6} = A_p + (E_{c6} / E_{cp}) * A_m$  ! j. w. lecz betonowanych w fazie 6  
 $A_{c7} = A_p + (E_{c7} / E_{cp}) * A_m$  ! j. w. lecz betonowanych w fazie 7  
 $A_{c8} = A_p + (E_{c8} / E_{cp}) * A_m$  ! j. w. lecz betonowanych w fazie 8  
 $A_{c9} = A_p + (E_{c9} / E_{cp}) * A_m$  ! j. w. lecz betonowanych w fazie 9

C  
 C  
 C  
 C  
 C

*Sprowadzony moment statyczny przekroju zespolonego*

-----

$S_1 = (1 - E_{c1} / E_{cp}) * A_p * h_p / 2 + A * U(1) * E_{c1} / E_{cp} / 2$   
 $S_2 = (1 - E_{c2} / E_{cp}) * A_p * h_p / 2 + A * U(1) * E_{c2} / E_{cp} / 2$   
 $S_3 = (1 - E_{c3} / E_{cp}) * A_p * h_p / 2 + A * U(1) * E_{c3} / E_{cp} / 2$   
 $S_4 = (1 - E_{c4} / E_{cp}) * A_p * h_p / 2 + A * U(1) * E_{c4} / E_{cp} / 2$   
 $S_5 = (1 - E_{c5} / E_{cp}) * A_p * h_p / 2 + A * U(1) * E_{c5} / E_{cp} / 2$

```

S6=(1-Ec6/Ecp)*Ap*hp/2+A*U(1)*Ec6/Ecp/2
S7=(1-Ec7/Ecp)*Ap*hp/2+A*U(1)*Ec7/Ecp/2
S8=(1-Ec8/Ecp)*Ap*hp/2+A*U(1)*Ec8/Ecp/2
S9=(1-Ec9/Ecp)*Ap*hp/2+A*U(1)*Ec9/Ecp/2

```

```

C
C
C
C
C

```

*Polozenie osi obojetnej*

-----

```

h1=S1/Ac1
h2=S2/Ac2
h3=S3/Ac3
h4=S4/Ac4
h5=S5/Ac5
h6=S6/Ac6
h7=S7/Ac7
h8=S8/Ac8
h9=S9/Ac9

```

```

C
C
C
C
C

```

*Srowadzony moment bezwladnosci przekroju zespolonego*

-----

```

I=B*U(1)**3/12    ! moment bezwladnosci przekroju betonowego
Ip=bp*hp**3/3     ! moment bezwladnosci przekroju prefabrykowanego

```

```

C

```

```

Ic1=(1-Ec1/Ecp)*(Ip+Ap*(hp/2-h1)**2)+
& (Ec1/Ecp)*(I+A*(U(1)/2-h1)**2)
Ic2=(1-Ec2/Ecp)*(Ip+Ap*(hp/2-h2)**2)+
& (Ec2/Ecp)*(I+A*(U(1)/2-h2)**2)
Ic3=(1-Ec3/Ecp)*(Ip+Ap*(hp/2-h3)**2)+
& (Ec3/Ecp)*(I+A*(U(1)/2-h3)**2)
Ic4=(1-Ec4/Ecp)*(Ip+Ap*(hp/2-h4)**2)+
& (Ec4/Ecp)*(I+A*(U(1)/2-h4)**2)
Ic5=(1-Ec5/Ecp)*(Ip+Ap*(hp/2-h5)**2)+
& (Ec5/Ecp)*(I+A*(U(1)/2-h5)**2)
Ic6=(1-Ec6/Ecp)*(Ip+Ap*(hp/2-h6)**2)+
& (Ec6/Ecp)*(I+A*(U(1)/2-h6)**2)
Ic7=(1-Ec7/Ecp)*(Ip+Ap*(hp/2-h7)**2)+
& (Ec7/Ecp)*(I+A*(U(1)/2-h7)**2)
Ic8=(1-Ec8/Ecp)*(Ip+Ap*(hp/2-h8)**2)+
& (Ec8/Ecp)*(I+A*(U(1)/2-h8)**2)
Ic9=(1-Ec9/Ecp)*(Ip+Ap*(hp/2-h9)**2)+
& (Ec9/Ecp)*(I+A*(U(1)/2-h9)**2)

```

```

C
C
C
C
C

```

*Charakterystyki geometryczne przekroju calego obiektu*

-----

```

A1=Ap
A2=Ap*(w1+w2+w3+w4+w5+w6+w7+w8+w11+w12+w13+w14+w15)+
& Ac1*(w9+w10+w16)
A3=Ap*(w1+w2+w3+w4+w5+w6+w7+w12+w13+w14)+
& Ac1*(w8+w11+w15)+Ac2*(w9+w10+w16)
A4=Ap*(w1+w2+w3+w4+w5+w6+w13)+

```

```

& Ac1*(w7+w12+w14)+Ac2*(w8+w11+w15)+Ac3*(w9+w10+w16)
A5=Ap*(w1+w2+w3+w4+w5)+Ac1*(w13+w6)+
& Ac2*(w7+w12+w14)+Ac3*(w8+w11+w15)+Ac4*(w9+w10+w16)
A6=Ap*(w1+w2+w3+w4)+Ac1*w5+Ac2*(w13+w6)+
& Ac3*(w7+w12+w14)+Ac4*(w8+w11+w15)+Ac5*(w9+w10+w16)
A7=Ap*(w1+w2+w3)+Ac1*w4+Ac2*w5+Ac3*(w13+w6)+
& Ac4*(w7+w12+w14)+Ac5*(w8+w11+w15)+Ac6*(w9+w10+w16)
A8=Ap*(w1+w2)+Ac1*w3+Ac2*w4+Ac3*w5+Ac4*(w13+w6)+
& Ac5*(w7+w12+w14)+Ac6*(w8+w11+w15)+Ac7*(w9+w10+w16)
A9=Ap*w1+Ac1*w2+Ac2*w3+Ac3*w4+Ac4*w5+Ac5*(w13+w6)+
& Ac6*(w7+w12+w14)+Ac7*(w8+w11+w15)+Ac8*(w9+w10+w16)
A10=Ac1*w1+Ac2*w2+Ac3*w3+Ac4*w4+Ac5*w5+Ac6*(w13+w6)+
& Ac7*(w7+w12+w14)+Ac8*(w8+w11+w15)+Ac9*(w9+w10+w16)
A11=A

```

```

C
I1=Ip
I2=Ip*(w1+w2+w3+w4+w5+w6+w7+w8+w11+w12+w13+w14+w15)+
& Ic1*(w9+w10+w16)
I3=Ip*(w1+w2+w3+w4+w5+w6+w7+w12+w13+w14)+
& Ic1*(w8+w11+w15)+Ic2*(w9+w10+w16)
I4=Ip*(w1+w2+w3+w4+w5+w6+w13)+
& Ic1*(w7+w12+w14)+Ic2*(w8+w11+w15)+Ic3*(w9+w10+w16)
I5=Ip*(w1+w2+w3+w4+w5)+Ic1*(w13+w6)+
& Ic2*(w7+w12+w14)+Ic3*(w8+w11+w15)+Ic4*(w9+w10+w16)
I6=Ip*(w1+w2+w3+w4)+Ic1*w5+Ic2*(w13+w6)+
& Ic3*(w7+w12+w14)+Ic4*(w8+w11+w15)+Ic5*(w9+w10+w16)
I7=Ip*(w1+w2+w3)+Ic1*w4+Ic2*w5+Ic3*(w13+w6)+
& Ic4*(w7+w12+w14)+Ic5*(w8+w11+w15)+Ic6*(w9+w10+w16)
I8=Ip*(w1+w2)+Ic1*w3+Ic2*w4+Ic3*w5+Ic4*(w13+w6)+
& Ic5*(w7+w12+w14)+Ic6*(w8+w11+w15)+Ic7*(w9+w10+w16)
I9=Ip*w1+Ic1*w2+Ic2*w3+Ic3*w4+Ic4*w5+Ic5*(w13+w6)+
& Ic6*(w7+w12+w14)+Ic7*(w8+w11+w15)+Ic8*(w9+w10+w16)
I10=Ic1*w1+Ic2*w2+Ic3*w3+Ic4*w4+Ic5*w5+Ic6*(w13+w6)+
& Ic7*(w7+w12+w14)+Ic8*(w8+w11+w15)+Ic9*(w9+w10+w16)
I11=I

```

```

C
C
C Obciazenia odniesione do osi luku
C -----

```

```

C Ciezar wlasny luku prefabrykowanego:
C

```

```

qpn1=Ap*Gc*T/R1 ! C. wl. luku prefabrykowa.Ap
! centralnego - obc. styczne,
qpn2=Ap*Gc*(T-x2)/R2 ! C. wl. luku prefabrykowa.Ap
! skrajnego - obc. styczne,
qpp1=Ap*Gc*SQRT(R1**2-b1*T**2)/R1 ! C. wl. luku prefabrykowanego
! centralnego - obc. normalne,
qpp2=Ap*Gc*SQRT(R2**2-b2*(T-x2)**2)/R2 ! C. wl. luku prefabrykow
! skrajnego - obc. normalne.

```

```

C
C Ciezar odparowanej wody:
C

```

```

qhn1=0.1*Am*Gw*T/R1 ! C. wl. odparowanej wody, luk
! centralny - obc. styczne,

```

```

qhn2=0.1*Am*Gw*(T-x2)/R2          ! C. wl. odparowanej wody, luk
! skrajny - obc. styczne,
qhp1=0.1*Am*Gw*SQRT(R1**2-b1*T**2)/R1 ! Ciezar odparowanej wody, luk
! centralny - obc. normalne,
qhp2=0.1*Am*Gw*SQRT(R2**2-b2*(T-x2)**2)/R2 ! Ciezar odparowanej wody,
! luk skrajny - obc. normalne.

```

C

C Ciezar mieszanki betonowej

C

```

qmn1=Am*Gm*T/R1          ! C. wl. mieszanki bet., luk
! centralny - obc. styczne,
qmn2=Am*Gm*(T-x2)/R2    ! C. wl. mieszanki bet., luk
! skrajny - obc. styczne,
qmp1=Am*Gm*SQRT(R1**2-b1*T**2)/R1 ! Ciezar mieszanki bet., luk
! centralny - obc. normalne,
qmp2=Am*Gm*SQRT(R2**2-b2*(T-x2)**2)/R2 ! Ciezar mieszanki bet.,
! luk skrajny - obc. normalne.

```

C

C Obciazenie technologiczne ciagle:

C

```

qtn1=qt*T*SQRT(R1**2-b1*T**2)/R1**2 ! Technolog. styczne
! nad lukiem centralnym,
qtn2=qt*(T-x2)*SQRT(R2**2-b2*(T-x2)**2)/R2**2 ! Technolog. styczne
! nad lukiem skrajnym,
qtp1=qt*(R1**2-T**2)/R1**2          ! Technolog. normalne
! nad lukiem centralnym,
qtp2=qt*(R2**2-(T-x2)**2)/R2**2    ! Technolog. normalne
! nad lukiem skrajnym.

```

C

C Obciazenie wiatrem:

C

```

qwn1=qw*T*SQRT(R1**2-b1*T**2)/R1**2 ! Obc. wiatrem styczne
! nad lukiem centralnym,
qwn2=qw*(T-x2)*SQRT(R2**2-b2*(T-x2)**2)/R2**2 ! Obc. w. styczne
! nad lukiem skrajnym,
qwp1=qw*(R1**2-T**2)/R1**2          ! Obc. wiatrem normalne
! nad lukiem centralnym,
qwp2=qw*(R2**2-(T-x2)**2)/R2**2    ! Obc. wiatrem normalne
! nad lukiem skrajnym.

```

C

C Obciazenie calkowite styczne:

C

```

n1=qpn1*(w1+w2+w3+w4+w5+w6+w7+w8+w9)+qpn2*(w10+w11+w12+w13+w14+
& w15+w16)+qmn1*w9+qmn2*(w10+w16)+qwn1*w9+qwn2*(w10+w16)
n2=qmn1*w8+qmn2*(w11+w15)-qhn1*w9-qhn2*(w10+w16)+
& qtn1*w9+qtn2*(w10+w16)+qwn1*w8+qwn2*(w11+w15)
n3=qmn1*w7+qmn2*(w12+w14)-qhn1*w8-qhn2*(w11+w15)+
& qtn1*w8+qtn2*(w11+w15)-qtn1*w9-qtn2*(w10+w16)+
& qwn1*w7+qwn2*(w12+w14)
n4=qmn1*w6+qmn2*w13-qhn1*w7-qhn2*(w12+w14)+
& qtn1*w7+qtn2*(w12+w14)-qtn1*w8-qtn2*(w11+w15)+qwn1*w6+qwn2*w13
n5=qmn1*w5-qhn1*w6-qhn2*w13+qtn1*w6-qtn1*w7-qtn2*(w12+w14)+
& qwn1*w5
n6=qmn1*w4-qhn1*w5+qtn1*w5-qtn1*w6+qwn1*w4
n7=qmn1*w3-qhn1*w4+qtn1*w4-qtn1*w5+qwn1*w3

```

```

n8=qmn1*w2-qhn1*w3+qtn1*w3-qtn1*w4+qwn1*w2
n9=qmn1*w1-qhn1*w2+qtn1*w2-qtn1*w3+qwn1*w1
n10=p05n+p04n+p02n+p054n+p043n+p032n+p021n-qhn1*w1-qtn1*w2
n11=pe5n+pe4n+pe2n

```

C

C *Obciazenie calkowite normalne:*

C

```

p1=qpp1*(w1+w2+w3+w4+w5+w6+w7+w8+w9)+qpp2*(w10+w11+w12+w13+w14+
& w15+w16)+qmp1*w9+qmp2*(w10+w16)+qwp1*w9+qwp2*(w10+w16)
p2=qmp1*w8+qmp2*(w11+w15)-qhp1*w9-qhp2*(w10+w16)+
& qtp1*w9+qtp2*(w10+w16)+qwp1*w8+qwp2*(w11+w15)
p3=qmp1*w7+qmp2*(w12+w14)-qhp1*w8-qhp2*(w11+w15)+
& qtp1*w8+qtp2*(w11+w15)-qtp1*w9-qtp2*(w10+w16)+
& qwp1*w7+qwp2*(w12+w14)
p4=qmp1*w6+qmp2*w13-qhp1*w7-qhp2*(w12+w14)+
& qtp1*w7+qtp2*(w12+w14)-qtp1*w8-qtp2*(w11+w15)+qwp1*w6+qwp2*w13
p5=qmp1*w5-qhp1*w6-qhp2*w13+qtp1*w6-qtp1*w7-qtp2*(w12+w14)+
& qwp1*w5
p6=qmp1*w4-qhp1*w5+qtp1*w5-qtp1*w6+qwp1*w4
p7=qmp1*w3-qhp1*w4+qtp1*w4-qtp1*w5+qwp1*w3
p8=qmp1*w2-qhp1*w3+qtp1*w3-qtp1*w4+qwp1*w2
p9=qmp1*w1-qhp1*w2+qtp1*w2-qtp1*w3+qwp1*w1
p10=p05p+p04p+p02p+p054p+p043p+p032p+p021p-qhp1*w1-qtp1*w2
p11=pe5p+pe4p+pe2p

```

C

C

C *Rownania stanu w przedzialach calkowania i stanach pracy*

C -----

C

```

IF (IPHASE .EQ. 1) THEN

```

C

C *Obliczenie obciazen odpowiadajacych obciazeniom skupionym*

C

```

DO 15, K=0,26
  IF (abs(T-Y(K)) .LT. 0.001) THEN
    T0=Y(K+1)
    DELTA=T0-T
  ELSE
    DELTA=1
  END IF

```

15

```

CONTINUE

```

C

C

```

ptn=Pt/DELTA*T*SQRT(R1**2-b1*T**2)/R1**2
ptp=Pt/DELTA*(R1**2-T**2)/R1**2
prn=Pr/DELTA*T*SQRT(R1**2-b1*T**2)/R1**2
prp=Pr/DELTA*(R1**2-T**2)/R1**2

```

C

C *Obciazenia skupione od K, q i p (skladowa styczna i normalna)*

C

```

pk1n=(WK5*0.5*K15/0.952+WK4*K14/1.218+WK2*K12/1.533)*
& T*SQRT(R1**2-b1*T**2)/R1**2
pk2n=(WK5*0.5*K25/0.952+WK4*K24/1.218+WK2*K22/1.533)*
& T*SQRT(R1**2-b1*T**2)/R1**2
pk3n=(WK5*0.5*K35/0.952+WK4*K34/1.218+WK2*K32/1.533)*

```

```

&      T*SQRT(R1**2-b1*T**2)/R1**2
pk4n=(WK5*0.5*K45/0.952+WK4*K44/1.218+WK2*K42/1.533)*
&      T*SQRT(R1**2-b1*T**2)/R1**2
pk5n=(WK5*0.5*K55/0.952+WK4*K54/1.218+WK2*K52/1.533)*
&      T*SQRT(R1**2-b1*T**2)/R1**2
C
pk1p=(WK5*0.5*K15/0.952+WK4*K14/1.218+WK2*K12/1.533)*
&      (R1**2-T**2)/R1**2
pk2p=(WK5*0.5*K25/0.952+WK4*K24/1.218+WK2*K22/1.533)*
&      (R1**2-T**2)/R1**2
pk3p=(WK5*0.5*K35/0.952+WK4*K34/1.218+WK2*K32/1.533)*
&      (R1**2-T**2)/R1**2
pk4p=(WK5*0.5*K45/0.952+WK4*K44/1.218+WK2*K42/1.533)*
&      (R1**2-T**2)/R1**2
pk5p=(WK5*0.5*K55/0.952+WK4*K54/1.218+WK2*K52/1.533)*
&      (R1**2-T**2)/R1**2
C
C
C etap 1 montazu lukow
F(1)=(X(5)+X(2)*R1)/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES1)
F(2)=(X(3)*R1/(Ecp*I1*SQRT(R1*R1-(T-x1)**2)))*(1-ES1)
F(3)=(X(4)*R1/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES1)
F(4)=((-X(6)-(p1+ws8*prp)*R1)/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES1)
F(5)=(X(6)*R1/(Ecp*A1)+X(1))/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES1)
F(6)=(X(4)-(n1+ws8*prn)*R1)/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES1)
C etap 2 montazu lukow
F(7)=(X(11)+X(8)*R1)/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES2)
F(8)=(X(9)*R1/(Ecp*I2*SQRT(R1*R1-(T-x1)**2)))*(1-ES2)
F(9)=(X(10)*R1/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES2)
F(10)=((-X(12)-(p2+prp*(ws7-ws8)+ptp*ws8)*R1)
&      /SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES2)
F(11)=(X(12)*R1/(Ecp*A2)+X(7))/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES2)
F(12)=(X(10)-(n2+prn*(ws7-ws8)+ptn*ws8)*R1)
&      /SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES2)
C etap 3 montazu lukow
F(13)=(X(17)+X(14)*R1)/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES3)
F(14)=(X(15)*R1/(Ecp*I3*SQRT(R1*R1-(T-x1)**2)))*(1-ES3)
F(15)=(X(16)*R1/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES3)
F(16)=((-X(18)-(p3+prp*(ws6-ws7)+ptp*(ws7-ws8))*R1)
&      /SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES3)
F(17)=(X(18)*R1/(Ecp*A3)+X(13))/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES3)
F(18)=(X(16)-(n3+prn*(ws6-ws7)+ptn*(ws7-ws8))*R1)
&      /SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES3)
C etap 4 montazu lukow
F(19)=(X(23)+X(20)*R1)/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES4)
F(20)=(X(21)*R1/(Ecp*I4*SQRT(R1*R1-(T-x1)**2)))*(1-ES4)
F(21)=(X(22)*R1/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES4)
F(22)=((-X(24)-(p4+prp*(ws5-ws6)+ptp*(ws6-ws7))*R1)
&      /SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES4)
F(23)=(X(24)*R1/(Ecp*A4)+X(19))/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES4)
F(24)=(X(22)-(n4+prn*(ws5-ws6)+ptn*(ws6-ws7))*R1)
&      /SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES4)
C etap 5 montazu lukow
F(25)=(X(29)+X(26)*R1)/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES5)
F(26)=(X(27)*R1/(Ecp*I5*SQRT(R1*R1-(T-x1)**2)))*(1-ES5)

```

```

F(27)=(X(28)*R1/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES5)
F(28)=((-X(30)-(p5+prp*(ws4-ws5)+ptp*(ws5-ws6))*R1)
&
/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES5)
F(29)=(X(30)*R1/(Ecp*A5)+X(25))/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES5)
F(30)=(X(28)-(n5+prn*(ws4-ws5)+ptn*(ws5-ws6))*R1)
&
/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES5)
C etap 6 montazu lukow
F(31)=(X(35)+X(32)*R1)/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES6)
F(32)=(X(33)*R1/(Ecp*I6*SQRT(R1*R1-(T-x1)**2)))*(1-ES6)
F(33)=(X(34)*R1/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES6)
F(34)=((-X(36)-(p6+prp*(ws3-ws4)+ptp*(ws4-ws5))*R1)
&
/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES6)
F(35)=(X(36)*R1/(Ecp*A6)+X(31))/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES6)
F(36)=(X(34)-(n6+prn*(ws3-ws4)+ptn*(ws4-ws5))*R1)
&
/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES6)
C etap 7 montazu lukow
F(37)=(X(41)+X(38)*R1)/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES7)
F(38)=(X(39)*R1/(Ecp*I7*SQRT(R1*R1-(T-x1)**2)))*(1-ES7)
F(39)=(X(40)*R1/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES7)
F(40)=((-X(42)-(p7+prp*(ws2-ws3)+ptp*(ws3-ws4))*R1)
&
/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES7)
F(41)=(X(42)*R1/(Ecp*A7)+X(37))/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES7)
F(42)=(X(40)-(n7+prn*(ws2-ws3)+ptn*(ws3-ws4))*R1)
&
/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES7)
C etap 8 montazu lukow
F(43)=(X(47)+X(44)*R1)/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES8)
F(44)=(X(45)*R1/(Ecp*I8*SQRT(R1*R1-(T-x1)**2)))*(1-ES8)
F(45)=(X(46)*R1/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES8)
F(46)=((-X(48)-(p8+prp*(ws1-ws2)+ptp*(ws2-ws3))*R1)
&
/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES8)
F(47)=(X(48)*R1/(Ecp*A8)+X(43))/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES8)
F(48)=(X(46)-(n8+prn*(ws1-ws2)+ptn*(ws2-ws3))*R1)
&
/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES8)
C etap 9 montazu lukow
F(49)=(X(53)+X(50)*R1)/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES9)
F(50)=(X(51)*R1/(Ecp*I9*SQRT(R1*R1-(T-x1)**2)))*(1-ES9)
F(51)=(X(52)*R1/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES9)
F(52)=((-X(54)-(p9+prp*(ws0-ws1)+ptp*(ws1-ws2))*R1)
&
/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES9)
F(53)=(X(54)*R1/(Ecp*A9)+X(49))/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES9)
F(54)=(X(52)-(n9+prn*(ws0-ws1)+ptn*(ws1-ws2))*R1)
&
/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES9)
C etap 10 - montaz plyty pomostu
F(55)=(X(59)+X(56)*R1)/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES10)
F(56)=(X(57)*R1/(Ecp*I10*SQRT(R1*R1-(T-x1)**2)))*(1-ES10)
F(57)=(X(58)*R1/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES10)
F(58)=((-X(60)-(p10-prp*ws0-ptp*ws1)*R1)
&
/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES10)
F(59)=(X(60)*R1/(Ecp*A10)+X(55))
&
/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES10)
F(60)=(X(58)-(n10-prn*ws0-ptn*ws1)*R1)
&
/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES10)
C Eksploatacja - stale
F(61)=(X(65)+X(62)*R1)/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES11)
F(62)=(X(63)*R1/(Ec*I11*SQRT(R1*R1-(T-x1)**2)))*(1-ES11)

```

```

F(63)=(X(64)*R1/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES11)
F(64)=((-X(66)-p11*R1)/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES11)
F(65)=(X(66)*R1/(Ec*A11)+X(61))
&
  /SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES11)
C K1
F(66)=((X(64)-n11*R1)/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES11)

F(67)=((X(71)+X(68)*R1)/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES11)
F(68)=(X(69)*R1/(Ec*I*SQRT(R1*R1-(T-x1)**2)))*(1-ES11)
F(69)=(X(70)*R1/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES11)
F(70)=((-X(72)-pk1p*R1)/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES11)
F(71)=(X(72)*R1/(Ec*A)+X(67))
&
  /SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES11)
C K2
F(72)=((X(70)-pk1n*R1)/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES11)

F(73)=((X(77)+X(74)*R1)/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES11)
F(74)=(X(75)*R1/(Ec*I*SQRT(R1*R1-(T-x1)**2)))*(1-ES11)
F(75)=(X(76)*R1/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES11)
F(76)=((-X(78)-pk2p*R1)/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES11)
F(77)=(X(78)*R1/(Ec*A)+X(73))
&
  /SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES11)
C K3
F(78)=((X(76)-pk2n*R1)/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES11)

F(79)=((X(83)+X(80)*R1)/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES11)
F(80)=(X(81)*R1/(Ec*I*SQRT(R1*R1-(T-x1)**2)))*(1-ES11)
F(81)=(X(82)*R1/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES11)
F(82)=((-X(84)-pk3p*R1)/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES11)
F(83)=(X(84)*R1/(Ec*A)+X(79))
&
  /SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES11)
C K4
F(84)=((X(82)-pk3n*R1)/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES11)

F(85)=((X(89)+X(86)*R1)/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES11)
F(86)=(X(87)*R1/(Ec*I*SQRT(R1*R1-(T-x1)**2)))*(1-ES11)
F(87)=(X(88)*R1/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES11)
F(88)=((-X(90)-pk4p*R1)/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES11)
F(89)=(X(90)*R1/(Ec*A)+X(85))
&
  /SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES11)
C K5
F(90)=((X(88)-pk4n*R1)/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES11)

F(91)=((X(95)+X(92)*R1)/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES11)
F(92)=(X(93)*R1/(Ec*I*SQRT(R1*R1-(T-x1)**2)))*(1-ES11)
F(93)=(X(94)*R1/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES11)
F(94)=((-X(96)-pk5p*R1)/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES11)
F(95)=(X(96)*R1/(Ec*A)+X(91))
&
  /SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ES11)
C
C obietosc V
C
F(97)=(A*R1/SQRT(R1*R1-(T-x1)**2))*(1-ECSD0-ECSA0)
C
ELSE IF (IPHASE .EQ. 2) THEN
C
C Obliczenie obciazen odpowiadajacym obciazeniom skupionym
C
DO 20, K=26,46

```



```

      IF (abs(T-Y(K)) .LT. 0.001) THEN
        T0=Y(K+1)
        DELTA=T0-T
      ELSE
        DELTA=1
      END IF
20  CONTINUE
      IF (K .EQ. 47) THEN
        DELTA=1
      END IF
c
      ptn=Pt/DELTA*(T-x2)*SQRT(R2**2-b2*(T-x2)**2)/R2**2
      ptp=Pt/DELTA*(R2**2-b2*(T-x2)**2)/R2**2
      prn=Pr/DELTA*(T-x2)*SQRT(R2**2-b2*(T-x2)**2)/R2**2
      prp=Pr/DELTA*(R2**2-b2*(T-x2)**2)/R2**2
c
C Obciążenia skupione od K, q i p (składowa styczna i normalna)
C
      pk1n=(WK5*0.5*K15/0.952+WK4*K14/1.218+WK2*K12/1.533)*
&      (T-x2)*SQRT(R2**2-b2*(T-x2)**2)/R2**2
      pk2n=(WK5*0.5*K25/0.952+WK4*K24/1.218+WK2*K22/1.533)*
&      (T-x2)*SQRT(R2**2-b2*(T-x2)**2)/R2**2
      pk3n=(WK5*0.5*K35/0.952+WK4*K34/1.218+WK2*K32/1.533)*
&      (T-x2)*SQRT(R2**2-b2*(T-x2)**2)/R2**2
      pk4n=(WK5*0.5*K45/0.952+WK4*K44/1.218+WK2*K42/1.533)*
&      (T-x2)*SQRT(R2**2-b2*(T-x2)**2)/R2**2
      pk5n=(WK5*0.5*K55/0.952+WK4*K54/1.218+WK2*K52/1.533)*
&      (T-x2)*SQRT(R2**2-b2*(T-x2)**2)/R2**2
C
      pk1p=(WK5*0.5*K15/0.952+WK4*K14/1.218+WK2*K12/1.533)*
&      (R2**2-b2*(T-x2)**2)/R2**2
      pk2p=(WK5*0.5*K25/0.952+WK4*K24/1.218+WK2*K22/1.533)*
&      (R2**2-b2*(T-x2)**2)/R2**2
      pk3p=(WK5*0.5*K35/0.952+WK4*K34/1.218+WK2*K32/1.533)*
&      (R2**2-b2*(T-x2)**2)/R2**2
      pk4p=(WK5*0.5*K45/0.952+WK4*K44/1.218+WK2*K42/1.533)*
&      (R2**2-b2*(T-x2)**2)/R2**2
      pk5p=(WK5*0.5*K55/0.952+WK4*K54/1.218+WK2*K52/1.533)*
&      (R2**2-b2*(T-x2)**2)/R2**2
c
C
C etap 1 montazu lukow
      F(1)=(X(5)+X(2)*R2)/SQRT(R2*R2-(T-x2)**2))*(1-ES1)
      F(2)=(X(3)*R2/(Ecp*I1*SQRT(R2*R2-(T-x2)**2)))*(1-ES1)
      F(3)=(X(4)*R2/SQRT(R2*R2-(T-x2)**2))*(1-ES1)
      F(4)=((-X(6)-(p1+prp*(ws10+ws15))*R2)
&      /SQRT(R2*R2-(T-x2)**2))*(1-ES1)
      F(5)=(X(6)*R2/(Ecp*A1)+X(1))/SQRT(R2*R2-(T-x2)**2))*(1-ES1)
      F(6)=((X(4)-(n1+prn*(ws10+ws15))*R2)
&      /SQRT(R2*R2-(T-x2)**2))*(1-ES1)
C etap 2 montazu lukow
      F(7)=(X(11)+X(8)*R2)/SQRT(R2*R2-(T-x2)**2))*(1-ES2)
      F(8)=(X(9)*R2/(Ecp*I2*SQRT(R2*R2-(T-x2)**2)))*(1-ES2)
      F(9)=(X(10)*R2/SQRT(R2*R2-(T-x2)**2))*(1-ES2)
      F(10)=((-X(12)-(p2+prp*(-ws10+ws11+ws14-ws15)

```

```

&      +ptp*(ws10+ws15))*R2)/SQRT(R2*R2-(T-x2)**2))*(1-ES2)
F(11)=(X(12)*R1/(Ecp*A2)+X(7))/SQRT(R2*R2-(T-x2)**2))*(1-ES2)
F(12)=(X(10)-(n2+prn*(-ws10+ws11+ws14-ws15)
&      +ptn*(ws10+ws15))*R2)/SQRT(R2*R2-(T-x2)**2))*(1-ES2)
C etap 3 montazu lukow
F(13)=(X(17)+X(14)*R2)/SQRT(R2*R2-(T-x2)**2))*(1-ES3)
F(14)=(X(15)*R2/(Ecp*I3*SQRT(R2*R2-(T-x2)**2)))*(1-ES3)
F(15)=(X(16)*R2/SQRT(R2*R2-(T-x2)**2))*(1-ES3)
F(16)=((-X(18)-(p3+prp*(-ws11+ws12+ws13-ws14)
&      +ptp*(-ws10+ws11+ws14-ws15))*R2)
&      /SQRT(R2*R2-(T-x2)**2))*(1-ES3)
F(17)=(X(18)*R2/(Ecp*A3)+X(13))/SQRT(R2*R2-(T-x2)**2))*(1-ES3)
F(18)=(X(16)-(n3+prn*(-ws11+ws12+ws13-ws14)
&      +ptn*(-ws10+ws11+ws14-ws15))*R2)
&      /SQRT(R2*R2-(T-x2)**2))*(1-ES3)
C etap 4 montazu lukow
F(19)=(X(23)+X(20)*R2)/SQRT(R2*R2-(T-x2)**2))*(1-ES4)
F(20)=(X(21)*R2/(Ecp*I4*SQRT(R2*R2-(T-x2)**2)))*(1-ES4)
F(21)=(X(22)*R2/SQRT(R2*R2-(T-x2)**2))*(1-ES4)
F(22)=((-X(24)-(p4-prp*ws12
&      +ptp*(-ws11+ws12+ws13-ws14))*R2)
&      /SQRT(R2*R2-(T-x2)**2))*(1-ES4)
F(23)=(X(24)*R2/(Ecp*A4)+X(19))/SQRT(R2*R2-(T-x2)**2))*(1-ES4)
F(24)=(X(22)-(n4-prn*ws12
&      +ptn*(-ws11+ws12+ws13-ws14))*R2)
&      /SQRT(R2*R2-(T-x2)**2))*(1-ES4)
C etap 5 montazu lukow
F(25)=(X(29)+X(26)*R2)/SQRT(R2*R2-(T-x2)**2))*(1-ES5)
F(26)=(X(27)*R2/(Ecp*I5*SQRT(R2*R2-(T-x2)**2)))*(1-ES5)
F(27)=(X(28)*R2/SQRT(R2*R2-(T-x2)**2))*(1-ES5)
F(28)=((-X(30)-(p5-prp*ws13-ptp*(ws12+ws13))*R2)
&      /SQRT(R2*R2-(T-x2)**2))*(1-ES5)
F(29)=(X(30)*R2/(Ecp*A5)+X(25))/SQRT(R2*R2-(T-x2)**2))*(1-ES5)
F(30)=(X(28)-(n5-prn*ws13-ptn*(ws12+ws13))*R2)
&      /SQRT(R2*R2-(T-x2)**2))*(1-ES5)
C etap 6 montazu lukow
F(31)=(X(35)+X(32)*R2)/SQRT(R2*R2-(T-x2)**2))*(1-ES6)
F(32)=(X(33)*R2/(Ecp*I6*SQRT(R2*R2-(T-x2)**2)))*(1-ES6)
F(33)=(X(34)*R2/SQRT(R2*R2-(T-x2)**2))*(1-ES6)
F(34)=((-X(36)-p6*R2)/SQRT(R2*R2-(T-x2)**2))*(1-ES6)
F(35)=(X(36)*R2/(Ecp*A6)+X(31))/SQRT(R2*R2-(T-x2)**2))*(1-ES6)
F(36)=(X(34)-n6*R2)/SQRT(R2*R2-(T-x2)**2))*(1-ES6)
C etap 7 montazu lukow
F(37)=(X(41)+X(38)*R2)/SQRT(R2*R2-(T-x2)**2))*(1-ES7)
F(38)=(X(39)*R2/(Ecp*I7*SQRT(R2*R2-(T-x2)**2)))*(1-ES7)
F(39)=(X(40)*R2/SQRT(R2*R2-(T-x2)**2))*(1-ES7)
F(40)=((-X(42)-p7*R2)/SQRT(R2*R2-(T-x2)**2))*(1-ES7)
F(41)=(X(42)*R2/(Ecp*A7)+X(37))/SQRT(R2*R2-(T-x2)**2))*(1-ES7)
F(42)=(X(40)-n7*R2)/SQRT(R2*R2-(T-x2)**2))*(1-ES7)
C etap 8 montazu lukow
F(43)=(X(47)+X(44)*R2)/SQRT(R2*R2-(T-x2)**2))*(1-ES8)
F(44)=(X(45)*R2/(Ecp*I8*SQRT(R2*R2-(T-x2)**2)))*(1-ES8)
F(45)=(X(46)*R2/SQRT(R2*R2-(T-x2)**2))*(1-ES8)
F(46)=((-X(48)-p8*R2)/SQRT(R2*R2-(T-x2)**2))*(1-ES8)
F(47)=(X(48)*R2/(Ecp*A8)+X(43))/SQRT(R2*R2-(T-x2)**2))*(1-ES8)

```

$$F(48) = ((X(46) - n8 * R2) / \text{SQRT}(R2 * R2 - (T - x2) ** 2)) * (1 - ES8)$$

C etap 9 montazu lukow

$$F(49) = ((X(53) + X(50) * R2) / \text{SQRT}(R2 * R2 - (T - x2) ** 2)) * (1 - ES9)$$

$$F(50) = (X(51) * R2 / (\text{Ec}p * I9 * \text{SQRT}(R2 * R2 - (T - x2) ** 2))) * (1 - ES9)$$

$$F(51) = (X(52) * R2 / \text{SQRT}(R2 * R2 - (T - x2) ** 2)) * (1 - ES9)$$

$$F(52) = ((-X(54) - p9 * R1) / \text{SQRT}(R2 * R2 - (T - x2) ** 2)) * (1 - ES9)$$

$$F(53) = ((X(54) * R2 / (\text{Ec}p * A9) + X(49)) / \text{SQRT}(R2 * R2 - (T - x2) ** 2)) * (1 - ES9)$$

$$F(54) = ((X(52) - n9 * R2) / \text{SQRT}(R2 * R2 - (T - x2) ** 2)) * (1 - ES9)$$

C etap 10 - montaz plyty pomostu

$$F(55) = ((X(59) + X(56) * R2) / \text{SQRT}(R2 * R2 - (T - x2) ** 2)) * (1 - ES10)$$

$$F(56) = (X(57) * R2 / (\text{Ec}p * I10 * \text{SQRT}(R2 * R2 - (T - x2) ** 2))) * (1 - ES10)$$

$$F(57) = (X(58) * R2 / \text{SQRT}(R2 * R2 - (T - x2) ** 2)) * (1 - ES10)$$

$$F(58) = ((-X(60) - p10 * R2) / \text{SQRT}(R2 * R2 - (T - x2) ** 2)) * (1 - ES10)$$

$$F(59) = ((X(60) * R2 / (\text{Ec}p * A10) + X(55))$$

$$\& \quad / \text{SQRT}(R2 * R2 - (T - x2) ** 2)) * (1 - ES10)$$

$$F(60) = ((X(58) - n10 * R2) / \text{SQRT}(R2 * R2 - (T - x2) ** 2)) * (1 - ES10)$$

C eksploatacja - stale

$$F(61) = ((X(65) + X(62) * R2) / \text{SQRT}(R2 * R2 - (T - x2) ** 2)) * (1 - ES11)$$

$$F(62) = (X(63) * R2 / (\text{Ec} * I11 * \text{SQRT}(R2 * R2 - (T - x2) ** 2))) * (1 - ES11)$$

$$F(63) = (X(64) * R2 / \text{SQRT}(R2 * R2 - (T - x2) ** 2)) * (1 - ES11)$$

$$F(64) = ((-X(66) - p11 * R2) / \text{SQRT}(R2 * R2 - (T - x2) ** 2)) * (1 - ES11)$$

$$F(65) = ((X(66) * R2 / (\text{Ec} * A11) + X(61))$$

$$\& \quad / \text{SQRT}(R2 * R2 - (T - x2) ** 2)) * (1 - ES11)$$

$$F(66) = ((X(64) - n11 * R2) / \text{SQRT}(R2 * R2 - (T - x2) ** 2)) * (1 - ES11)$$

C K1

$$F(67) = ((X(71) + X(68) * R2) / \text{SQRT}(R2 * R2 - (T - x2) ** 2)) * (1 - ES11)$$

$$F(68) = (X(69) * R2 / (\text{Ec} * I * \text{SQRT}(R2 * R2 - (T - x2) ** 2))) * (1 - ES11)$$

$$F(69) = (X(70) * R2 / \text{SQRT}(R2 * R2 - (T - x2) ** 2)) * (1 - ES11)$$

$$F(70) = ((-X(72) - pk1p * R2) / \text{SQRT}(R2 * R2 - (T - x2) ** 2)) * (1 - ES11)$$

$$F(71) = ((X(72) * R2 / (\text{Ec} * A) + X(67))$$

$$\& \quad / \text{SQRT}(R2 * R2 - (T - x2) ** 2)) * (1 - ES11)$$

$$F(72) = ((X(70) - pk1n * R2) / \text{SQRT}(R2 * R2 - (T - x2) ** 2)) * (1 - ES11)$$

C K2

$$F(73) = ((X(77) + X(74) * R2) / \text{SQRT}(R2 * R2 - (T - x2) ** 2)) * (1 - ES11)$$

$$F(74) = (X(75) * R2 / (\text{Ec} * I * \text{SQRT}(R2 * R2 - (T - x2) ** 2))) * (1 - ES11)$$

$$F(75) = (X(76) * R2 / \text{SQRT}(R2 * R2 - (T - x2) ** 2)) * (1 - ES11)$$

$$F(76) = ((-X(78) - pk2p * R2) / \text{SQRT}(R2 * R2 - (T - x2) ** 2)) * (1 - ES11)$$

$$F(77) = ((X(78) * R2 / (\text{Ec} * A) + X(73))$$

$$\& \quad / \text{SQRT}(R2 * R2 - (T - x2) ** 2)) * (1 - ES11)$$

$$F(78) = ((X(76) - pk2n * R2) / \text{SQRT}(R2 * R2 - (T - x2) ** 2)) * (1 - ES11)$$

C K3

$$F(79) = ((X(83) + X(80) * R2) / \text{SQRT}(R2 * R2 - (T - x2) ** 2)) * (1 - ES11)$$

$$F(80) = (X(81) * R2 / (\text{Ec} * I * \text{SQRT}(R2 * R2 - (T - x2) ** 2))) * (1 - ES11)$$

$$F(81) = (X(82) * R2 / \text{SQRT}(R2 * R2 - (T - x2) ** 2)) * (1 - ES11)$$

$$F(82) = ((-X(84) - pk3p * R2) / \text{SQRT}(R2 * R2 - (T - x2) ** 2)) * (1 - ES11)$$

$$F(83) = ((X(84) * R2 / (\text{Ec} * A) + X(79))$$

$$\& \quad / \text{SQRT}(R2 * R2 - (T - x2) ** 2)) * (1 - ES11)$$

$$F(84) = ((X(82) - pk3n * R2) / \text{SQRT}(R2 * R2 - (T - x2) ** 2)) * (1 - ES11)$$

C K4

$$F(85) = ((X(89) + X(86) * R2) / \text{SQRT}(R2 * R2 - (T - x2) ** 2)) * (1 - ES11)$$

$$F(86) = (X(87) * R2 / (\text{Ec} * I * \text{SQRT}(R2 * R2 - (T - x2) ** 2))) * (1 - ES11)$$

$$F(87) = (X(88) * R2 / \text{SQRT}(R2 * R2 - (T - x2) ** 2)) * (1 - ES11)$$

$$F(88) = ((-X(90) - pk4p * R2) / \text{SQRT}(R2 * R2 - (T - x2) ** 2)) * (1 - ES11)$$

$$F(89) = ((X(90) * R2 / (\text{Ec} * A) + X(85))$$

$$\& \quad / \text{SQRT}(R2 * R2 - (T - x2) ** 2)) * (1 - ES11)$$

```

      F(90) = ((X(88) - pk4n * R2) / SQRT(R2 * R2 - (T - x2) ** 2)) * (1 - ES11)
C K5
      F(91) = ((X(95) + X(92) * R2) / SQRT(R2 * R2 - (T - x2) ** 2)) * (1 - ES11)
      F(92) = (X(93) * R2 / (Ec * I * SQRT(R2 * R2 - (T - x2) ** 2))) * (1 - ES11)
      F(93) = (X(94) * R2 / SQRT(R2 * R2 - (T - x2) ** 2)) * (1 - ES11)
      F(94) = ((-X(96) - pk5p * R2) / SQRT(R2 * R2 - (T - x2) ** 2)) * (1 - ES11)
      F(95) = ((X(96) * R2 / (Ec * A) + X(91))
&          / SQRT(R2 * R2 - (T - x2) ** 2)) * (1 - ES11)
      F(96) = ((X(94) - pk5n * R2) / SQRT(R2 * R2 - (T - x2) ** 2)) * (1 - ES11)
C
C  Objetosc V
C
      F(97) = (A * R2 / SQRT(R2 * R2 - (T - x2) ** 2)) * (1 - ECSD0 - ECSA0)
C
C
      END IF
      RETURN
      END
C
C
C
C
C =====
      SUBROUTINE USRNBC (IKIND, NRNLN, NX, LU, LP, XL, UL, P, EL, RB,
&                      XR, UR, ER)
C =====
C
C                      WARUNKI BRZEGOWE
C                      =====
C
C  W tym podprogramie wprowadza się warunki brzegowe dla podpór
C  skrajnych i dla wewnętrznych punktów podparcia. Typ warunku, który
C  powinien być wprowadzony określa aktualna wartość parametru IKIND.
C
C  Gdy IKIND < 0 : ustalone warunki drugiego rodzaju
C  -----
C
C      IKIND = -1: X(TF) = R(X(T0), U(T0), P, T0, TF)
C                  obliczenie wartości zmiennych stanu w czasie końcowym
C                  TF, definiowanych przez funkcję R uzależniającą
C                  te wartości od czasu początkowego T0
C
C      IKIND = -K: X(E+) = R( X(E-), U(E-), P, E)
C                  obliczenie prawostronnych granic zmiennych stanu
C                  w K-tym zdarzeniu (K = 2, ..., M-1), definiowanych
C                  przez funkcję R uzależniającą te wartości od
C                  lewostronnych granic w tym samym zdarzeniach
C
C  Gdy IKIND > 0 : uwikłane warunki
C  -----
C
C      IKIND = 1: R(X(0)), U(0), P, 0, X(TF), U(TF), TF) = 0
C                  wprowadzenie warunków brzegowych w postaci
C                  nieliniowej funkcji R uzależniającej wartości
C                  w czasie początkowym T0 i końcowym TF
C
C      IKIND = K: R(X(E-), U(E-), P, E, X(E+), U(E+)) = 0
C                  wprowadzenie warunków brzegowych w punktach
C                  przełączeń i w punktach pomiędzy fazami w postaci

```

```

C          nieliniowej funkcji R w K-tym zdarzeniu
C          (K = 2, ..., M-1)
C
C Parametry WEJŚCIA:
C -----
C   IKIND  - specyfikuje warunek graniczny/przełączenia,
C           który powinien być obliczony (integer)
C   NRNLN  - numer warunku typu IKIND (integer)
C   NX     - liczba zmiennych stanu (integer)
C   LU     - liczba zmiennych sterujących (integer)
C   LP     - liczba parametrów sterowania (integer)
C   XL     - gdy IKIND < 0: XL = X(E(-IKIND)-)
C           lewostronna granica zmiennej stanu
C           w (-IKIND)-tym zdarzeniu
C           gdy IKIND = 1: XL = X(E(1))
C           zmienna stanu w czasie początkowym
C           gdy IKIND > 1: XL = X(E(IKIND)-)
C           lwostronna granica zmiennej stanu
C           w IKIND-tym zdarzeniu
C           (real array)
C   UL     - gdy IKIND < 0: UL = U(E(-IKIND)-)
C           lewostronna granica zmiennej sterującej
C           w (-IKIND)-tym zdarzeniu
C           gdy IKIND = 1: UL = U(E(1))
C           zmienna sterująca w czasie początkowym
C           gdy IKIND > 1: UL = U(E(IKIND)-)
C           lewostronna granica zmiennej sterującej
C           w IKIND-tym zdarzeniu
C           (real array)
C   P     - parametr sterowania (real array)
C   EL     - gdy IKIND < 0: (-IKIND)-te zdarzenie, EL = E(-IKIND)
C           gdy IKIND = 1, -1: czas początkowy, EL = E(1) = T0
C           gdy IKIND > 1: IKIND-te zdarzenie, EL = E(IKIND)
C           (real)
C   XR     - gdy IKIND < 0: wtedy XR jest parametrem WYJŚCIA!!!
C           gdy IKIND = 1: XR = X(E(M))
C           zmienna stanu w czasie końcowym
C           gdy IKIND > 1: XR = X(E(IKIND)+)
C           prawostronna granica zmiennej stanu
C           w IKIND-tym zdarzeniu
C           (real array)
C   UR     - gdy IKIND < 0: wtedy UR jest parametrem WYJŚCIA!!!
C           gdy IKIND = 1: UR = U(E(M))
C           zmienna sterująca w czasie końcowym
C           gdy IKIND > 1: UR = U(E(IKIND)+)
C           prawostronna granica zmiennej sterującej
C           w IKIND-tym zdarzeniu
C           (real array)
C   ER     - gdy IKIND >= -1: czas końcowy, ER = E(M) = TF
C           gdy IKIND < -1: nie używane
C           (real)
C
C Parametry WYJŚCIA:
C -----
C   RB     - gdy IKIND < 0: nie używane

```

```

C      gdy IKIND = 1: obliczone wartości wszystkich (nieliniowych)
C      granicznych warunków R uzależniających
C      wartości w początkowym i końcowym czasie
C      R( X(T0), U(T0), P, T0, TF)
C      gdy IKIND > 1: obliczone wartości wszystkich (nieliniowych)
C      granicznych warunków R uzależniających lewo
C      i prawostronne granice w IKIND-tym zdarzeniu
C      R(X(E-), U(E-), P, E, X(E+), U(E+))
C      (real array)
C      XR      -  gdy IKIND < 0: obliczone wartości komponentów tylko
C      prawostronnych granic zmiennych stanu,
C      które są definiowane przez ustalone
C      warunki graniczne/przełączenia
C      pierwszego rodzaju  XR = R( XL, UL, EL)
C      gdy IKIND > 0: wtedy XR jest parametrem WEJŚCIA!!!
C      (real array)
C      UR      -  gdy IKIND < 0: obliczone wartości komponentów tylko
C      prawostronnych granic zmiennej
C      sterującej, która jest zdefiniowana przez
C      ustalone warunki graniczne/przełączenia
C      drugiego rodzaju  UR = R( XL, UL, EL)
C      gdy IKIND > 0: wtedy UR jest parametrem WEJŚCIA!!!
C      (real array)
C      IFAIL   -  (optional)
C      IFAIL < 0 na wyjściu oznacza błąd (integer)

```

```

C
C      -----
C
C      IMPLICIT NONE

```

```

C      INTEGER  IKIND, NRNLN, NX, LU, LP

```

```

C      DOUBLE PRECISION

```

```

C      &XL(NX), XR(NX), UL(LU), UR(LU), P(LP), EL, ER, RB(NRNLN)

```

```

C      DOUBLE PRECISION

```

```

C      & Ea, Ec, Ga, Gc, Gm, Gw, fck, fcm, fd, fcd, fct, UGR1, UGR2,
C      & R1, R2, x1, x2, yc1, yc2, L1, L2, bp, hp, B, TOB, TC,
C      & qw, qt, Pt, Pr, y0, y1, y2, y3, y4, y5, y6, y7,
C      & y8, y9, y10, y11, y12, y13, y14, y15, y16, Y,
C      & gamg, gamt, gamr, gamw, gamm, game, P01, P02, P03, P04, P05,
C      & P054, P043, P032, P021, PE1, PE2, PE3, PE4, PE5, RH, BSC,
C      & K11, K12, K13, K14, K15, K21, K22, K23, K24, K25,
C      & K31, K32, K33, K34, K35, K41, K42, K43, K44, K45,
C      & K51, K52, K53, K54, K55

```

```

C      DIMENSION Y(0:47)

```

```

C      COMMON /USRCOM/

```

```

C      & Ea, Ec, Ga, Gc, Gm, Gw, fck, fcm, fd, fcd, fct, UGR1, UGR2,
C      & R1, R2, x1, x2, yc1, yc2, L1, L2, bp, hp, B, TOB, TC,
C      & qw, qt, Pt, Pr, y0, y1, y2, y3, y4, y5, y6, y7,
C      & y8, y9, y10, y11, y12, y13, y14, y15, y16, Y,
C      & gamg, gamt, gamr, gamw, gamm, game, P01, P02, P03, P04, P05,
C      & P054, P043, P032, P021, PE1, PE2, PE3, PE4, PE5, RH, BSC,
C      & K11, K12, K13, K14, K15, K21, K22, K23, K24, K25,
C      & K31, K32, K33, K34, K35, K41, K42, K43, K44, K45,

```

& K51, K52, K53, K54, K55

C

IF (IKIND .EQ. -1) THEN

C

XR(1)=0.

XR(3)=0.

XR(5)=0.

C

XR(7)=0.

XR(9)=0.

XR(11)=0.

C

XR(13)=0.

XR(15)=0.

XR(17)=0.

C

XR(19)=0.

XR(21)=0.

XR(23)=0.

C

XR(25)=0.

XR(27)=0.

XR(29)=0.

C

XR(31)=0.

XR(33)=0.

XR(35)=0.

C

XR(37)=0.

XR(39)=0.

XR(41)=0.

C

XR(43)=0.

XR(45)=0.

XR(47)=0.

C

XR(49)=0.

XR(51)=0.

XR(53)=0.

C

XR(55)=0.

XR(57)=0.

XR(59)=0.

C

XR(61)=0.

XR(63)=0.

XR(65)=0.

C

XR(67)=0.

XR(69)=0.

XR(71)=0.

C

XR(73)=0.

XR(75)=0.

XR(77)=0.

```
C
      XR(79)=0.
      XR(81)=0.
      XR(83)=0.
C
      XR(85)=0.
      XR(87)=0.
      XR(89)=0.
C
      XR(91)=0.
      XR(93)=0.
      XR(95)=0.
C
ELSE IF (IKIND .EQ. -2) THEN
C
      XR(1)=0.
      XR(2)=0.
      XR(5)=0.
C
      XR(7)=0.
      XR(8)=0.
      XR(11)=0.
C
      XR(13)=0.
      XR(14)=0.
      XR(17)=0.
C
      XR(19)=0.
      XR(20)=0.
      XR(23)=0.
C
      XR(25)=0.
      XR(26)=0.
      XR(29)=0.
C
      XR(31)=0.
      XR(32)=0.
      XR(35)=0.
C
      XR(37)=0.
      XR(38)=0.
      XR(41)=0.
C
      XR(43)=0.
      XR(44)=0.
      XR(47)=0.
C
      XR(49)=0.
      XR(50)=0.
      XR(53)=0.
C
      XR(55)=0.
      XR(56)=0.
      XR(59)=0.
C
```



```

XR(61)=0.
XR(62)=0.
XR(65)=0.
C
XR(67)=0.
XR(68)=0.
XR(71)=0.
C
XR(73)=0.
XR(74)=0.
XR(77)=0.
C
XR(79)=0.
XR(80)=0.
XR(83)=0.
C
XR(85)=0.
XR(86)=0.
XR(89)=0.
C
XR(91)=0.
XR(92)=0.
XR(95)=0.
C
XR(97)=XL(97)
C
ELSE IF (IKIND .EQ. 1) THEN
C
C Warunki dodatkowe w osi symetrii obiektu sformulowane w odniesieniu
C do obciazen symetrycznych wzgledem siebie
C
C Stan K1 - K5
RB(1)=XL(67)-XL(91)
RB(2)=XL(68)+XL(92)
RB(3)=XL(69)-XL(93)
RB(4)=XL(70)+XL(94)
RB(5)=XL(71)+XL(95)
RB(6)=XL(72)-XL(96)
C Stan K2 - K4
RB(7)=XL(73)-XL(85)
RB(8)=XL(74)+XL(86)
RB(9)=XL(75)-XL(87)
RB(10)=XL(76)+XL(88)
RB(11)=XL(77)+XL(89)
RB(12)=XL(78)-XL(90)
C
END IF
RETURN
END
C
C
C
C
C =====
SUBROUTINE USRNIC (IPHASE, NGNLN, NEEDG, NX, LU, LP,

```

& X, U, P, T, G)

```

C =====
C
C                               WIĘZY JEDNOSTRONNE
C                               =====
C
C   Podprogram ten służy do obliczania wartości wyrażenia G po jednej
C   stronie nierówności opisującej więzy:  $0 \leq G(X,U,P,T)$  w czasie T
C
C   Parametry WEJŚCIA:
C   -----
C   IPHASE - numer aktualnej fazy (integer)
C           1 <= IPHASE <= M1
C   NGNLN  - numer nieliniowej nierówności opisującej więzy
C           w fazie IPHASE (integer)
C   NEEDG  - tylko gdy NEEDG(I) > 0 I-ta nieliniowa nierówność
C           opisująca więzy w fazie IPHASE powinna być obliczana
C           (integer array)
C   NX     - liczba zmiennych stanu (integer)
C   LU     - liczba zmiennych sterujących (integer)
C   LP     - liczba parametrów sterowania (integer)
C   X      - zmienna stanu w czasie T (real array)
C   U      - zmienna sterująca w czasie T (real array)
C   P      - parametr sterowania (real array)
C   T      - czas, w którym funkcja G ma być obliczana (real)
C
C   Parametry WYJŚCIA:
C   -----
C   G      - obliczona wartość potrzebnego składnika
C           nieliniowej nierówności opisującej więzy w czasie T
C           (real array)
C   IFAIL  - (opcjonalnie)
C           IFAIL < 0 na wyjściu oznacza błąd (integer)
C
C   -----
C
C   IMPLICIT NONE
C
C   INTEGER  NGNLN, NX, LU, LP, IPHASE, NEEDG(NGNLN), K
C
C   DOUBLE PRECISION T, X(NX), U(LU), P(LP), G(NGNLN)
C
C
C   DOUBLE PRECISION
C   & Ea, Ec, Ga, Gc, Gm, Gw, fck, fcm, fd, fcd, fct, UGR1, UGR2,
C   & R1, R2, x1, x2, yc1, yc2, L1, L2, bp, hp, B, TOB, TC,
C   & qw, qt, Pt, Pr, y0, y1, y2, y3, y4, y5, y6, y7,
C   & y8, y9, y10, y11, y12, y13, y14, y15, y16,
C   & A, I, Y, gamg, gamt, gamr, gamw, P01, P02, P03, P04, P05,
C   & P054, P043, P032, P021, PE1, PE2, PE3, PE4, PE5, gamm, game,
C   & Ec1, Ec2, Ec3, Ec4, Ec5, Ec6, Ec7, Ec8, Ec9, Ecp, Ece,
C   & A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8, A9, A10, A11, Ap, Am,
C   & Ac1, Ac2, Ac3, Ac4, Ac5, Ac6, Ac7, Ac8, Ac9, Ac10,
C   & I1, I2, I3, I4, I5, I6, I7, I8, I9, I10, I11, Ip,

```

```

& Ic1, Ic2, Ic3, Ic4, Ic5, Ic6, Ic7, Ic8, Ic9, Ic10,
& W1, W2, W3, W4, W5, W6, W7, W8, W9, W10,
& W11, W12, W13, W14, W15, W16,
& SIG1, SIG2, SIG3, SIG4, SIG5, SIG6, SIG7, SIG8, SIG9,
& SIG10, SIG11,
& SID1, SID2, SID3, SID4, SID5, SID6, SID7, SID8, SID9,
& SUPG, SUPD, INFG, INF D, SGMAX, SDMAX, SGMIN, SDMIN,
& SG1, SG2, SG3, SG4, SG5, SG6, SG7, SG8, SG9, SG10, SG11,
& SD1, SD2, SD3, SD4, SD5, SD6, SD7, SD8, SD9, SD10, SD11,
& UG1, UG2, UG3, UG4, UG5, UG6, UG7, UG8, UG9, UG10, UG11,
& UGM, UGE, UG, UGK

```

C

**DOUBLE PRECISION**

```

& RH, HO, OB, FIRH, BETOB, BEFCM, BEH, BE, FITOB, FITC, BSC,
& h1, h2, h3, h4, h5, h6, h7, h8, h9,
& S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9,
& K11, K12, K13, K14, K15, K21, K22, K23, K24, K25,
& K31, K32, K33, K34, K35, K41, K42, K43, K44, K45,
& K51, K52, K53, K54, K55,
& SIGK1, SIGK2, SIGK3, SIGK4, SIGK5,
& SIDK1, SIDK2, SIDK3, SIDK4, SIDK5,
& UGK1, UGK2, UGK3, UGK4, UGK5, UGE1, UGE2, UGE3, UGE4, UGE5

```

C

```

DIMENSION Y(0:47)
DIMENSION BE(10)
DIMENSION FITC(10)

```

C

**COMMON /USRCOM/**

```

& Ea, Ec, Ga, Gc, Gm, Gw, fck, fcm, fd, fcd, fct, UGR1, UGR2,
& R1, R2, x1, x2, yc1, yc2, L1, L2, bp, hp, B, TOB, TC,
& qw, qt, Pt, Pr, y0, y1, y2, y3, y4, y5, y6, y7,
& y8, y9, y10, y11, y12, y13, y14, y15, y16, Y,
& gamg, gamt, gamr, gamw, gamm, game, P01, P02, P03, P04, P05,
& P054, P043, P032, P021, PE1, PE2, PE3, PE4, PE5, RH, BSC,
& K11, K12, K13, K14, K15, K21, K22, K23, K24, K25,
& K31, K32, K33, K34, K35, K41, K42, K43, K44, K45,
& K51, K52, K53, K54, K55

```

C

C

C *Obliczenie wartosci funkcji skokowej*

C -----

C

C *Funkcja skokowa  $W[i]=1$  w przedziale  $(y[i-1], y[i])$  - domknietym  
C z lewej strony. Poza tym przedzialem  $W[i]=0$ . Funkcja ta bedzie  
C zastosowana do zapisu odcinkowo stalego obciazenia w poszczegolnych  
C przedzialach betonowania.*

C

```

IF (T .GE. y0 .AND. T .LE. y1) THEN
  w1=1
ELSE
  w1=0
END IF
IF (T .GE. y1 .AND. T .LE. y2) THEN
  w2=1
ELSE

```

```
W2=0
END IF
IF (T .GE. y2 .AND. T .LE. y3) THEN
W3=1
ELSE
W3=0
END IF
IF (T .GE. y3 .AND. T .LE. y4) THEN
W4=1
ELSE
W4=0
END IF
IF (T .GE. y4 .AND. T .LE. y5) THEN
W5=1
ELSE
W5=0
END IF
IF (T .GE. y5 .AND. T .LE. y6) THEN
W6=1
ELSE
W6=0
END IF
IF (T .GE. y6 .AND. T .LE. y7) THEN
W7=1
ELSE
W7=0
END IF
IF (T .GE. y7 .AND. T .LE. y8) THEN
W8=1
ELSE
W8=0
END IF
IF (T .GE. y8 .AND. T .LE. y9) THEN
W9=1
ELSE
W9=0
END IF
IF (T .GE. y9 .AND. T .LE. y10) THEN
W10=1
ELSE
W10=0
END IF
IF (T .GE. y10 .AND. T .LE. y11) THEN
W11=1
ELSE
W11=0
END IF
IF (T .GE. y11 .AND. T .LE. y12) THEN
W12=1
ELSE
W12=0
END IF
IF (T .GE. y12 .AND. T .LE. y13) THEN
W13=1
ELSE
```

```

      W13=0
    END IF
    IF (T .GE. y13 .AND. T .LE. y14) THEN
      w14=1
    ELSE
      W14=0
    END IF
    IF (T .GE. y14 .AND. T .LE. y15) THEN
      w15=1
    ELSE
      W15=0
    END IF
    IF (T .GE. y15) THEN
      w16=1
    ELSE
      W16=0
    END IF
C
  A=B*U(1)           ! pole przekroju betonowego calkowite
  Ap=4*bp*hp        ! pole przekroju lukow prefabrykowanych
  Am= A-Ap          ! pole przekroju swiezego betonu
C
C Wspolczynnik pelzania betonu
C -----
C
C TOB   - czas (w dniach) obciazenia betonu liczony od dnia
C        betonowania. Zalożono, ze kazdy segment jest obciażony
C        (rozszałowany) po czasie TOB od dnia betonowania;
C TC    - czas trwania jednego cyklu betonowania;
C RH    - wilgotnosc wzgledna powietrza (liczba od 0,0 do 1,0);
C HO    - miarodajny wymiar przekroju [mm];
C OB    - obwod przekroju, ktory makontakt z powietrzem [m];
C FIRH  - funkcja empiryczna (PN: A3a, A3b);
C BETOB - funkcja empiryczna (PN: A5);
C BEFCM - funkcja empiryczna (PN: A.4);
c BEH   - funkcja empiryczna (PN: A.8);
C BE[I] - funkcja empiryczna dla betonu po czasie I*TC od chwili
C        obciazenia (PN: A.7);
C FITOB - wspolczynnik koncowy pelzania betonu obciazonego
C        po czasie TOB od dnia betonowania (PN: A.2);
C FITC[I]- wspolczynnik pelzania betonu po czasit I*TC od chwili
C        obciazenia (PN: A.1);
C
  OB=2*B+2*U(1)-4*bp
  HO=2*Am*1000/OB
  IF (fcm .LE. 35.0E3) THEN
    FIRH=1+(1-RH)/(0.1*HO**(1./3))
  ELSE
    FIRH=(1+(1-RH)*(35000/fcm)**0.7/(0.1*HO**(1./3)))*
&      (35000/fcm)**0.2
  END IF
  BETOB=1/(0.1+TOB**0.2)
  BEFCM=16.8/SQRT(fcm/1000)
  FITOB=FIRH*BETOB*BEFCM
  BEH=1.5*(1+(1.2*RH)**18)*HO+250.0

```

```

IF (BEH .GT. 1500) THEN
  BEH=1500
END IF
DO 5, K=1,10
  BE(K)=(K*TC/(BEH+K*TC))**0.3
  FITC(K)=FITOB*BE(K)
END DO

```

5

C

C *Modul Young'a betonu w fazie montazu plyty pomostu*

C

C

```

Ecp=Ec/(1+FITC(10))      ! modul Younga betonu prefabrykatow
                          ! w fazie montazu plyty pomostu
Ec1=Ec/(1+FITC(9))      ! modul Younga betonu ulozonego
                          ! w pierwszej fazie betonowania
Ec2=Ec/(1+FITC(8))      ! j. w. lecz w 2 fazie betonowania
Ec3=Ec/(1+FITC(7))      ! j. w. lecz w 3 fazie betonowania
Ec4=Ec/(1+FITC(6))      ! j. w. lecz w 4 fazie betonowania
Ec5=Ec/(1+FITC(5))      ! j. w. lecz w 5 fazie betonowania
Ec6=Ec/(1+FITC(4))      ! j. w. lecz w 6 fazie betonowania
Ec7=Ec/(1+FITC(3))      ! j. w. lecz w 7 fazie betonowania
Ec8=Ec/(1+FITC(2))      ! j. w. lecz w 8 fazie betonowania
Ec9=Ec/(1+FITC(1))      ! j. w. lecz w 9 fazie betonowania

```

C

```

Ece=Ec/(1+FITOB)

```

C

C *Sprowadzone pole powierzchni przekroju zespolonego*

C

C

```

A=B*U(1)                ! pole przekroju betonowego calkowite
Ap=4*bp*hp              ! pole przekroju lukow prefabrykowanych
Am= A-Ap                 ! pole przekroju swiezego betonu

```

C

```

Ac1=Ap+(Ec1/Ecp)*Am     ! sprowadzone pole powierzchni przekroju
                          ! segmentow betonowanych w fazie 1
Ac2=Ap+(Ec2/Ecp)*Am     ! j. w. lecz betonowanych w fazie 2
Ac3=Ap+(Ec3/Ecp)*Am     ! j. w. lecz betonowanych w fazie 3
Ac4=Ap+(Ec4/Ecp)*Am     ! j. w. lecz betonowanych w fazie 4
Ac5=Ap+(Ec5/Ecp)*Am     ! j. w. lecz betonowanych w fazie 5
Ac6=Ap+(Ec6/Ecp)*Am     ! j. w. lecz betonowanych w fazie 6
Ac7=Ap+(Ec7/Ecp)*Am     ! j. w. lecz betonowanych w fazie 7
Ac8=Ap+(Ec8/Ecp)*Am     ! j. w. lecz betonowanych w fazie 8
Ac9=Ap+(Ec9/Ecp)*Am     ! j. w. lecz betonowanych w fazie 9

```

C

C *Sprowadzony moment statyczny przekroju zespolonego*

C

C

```

S1=(1-Ec1/Ecp)*Ap*hp/2+A*U(1)*Ec1/Ecp/2
S2=(1-Ec2/Ecp)*Ap*hp/2+A*U(1)*Ec2/Ecp/2
S3=(1-Ec3/Ecp)*Ap*hp/2+A*U(1)*Ec3/Ecp/2
S4=(1-Ec4/Ecp)*Ap*hp/2+A*U(1)*Ec4/Ecp/2
S5=(1-Ec5/Ecp)*Ap*hp/2+A*U(1)*Ec5/Ecp/2
S6=(1-Ec6/Ecp)*Ap*hp/2+A*U(1)*Ec6/Ecp/2
S7=(1-Ec7/Ecp)*Ap*hp/2+A*U(1)*Ec7/Ecp/2
S8=(1-Ec8/Ecp)*Ap*hp/2+A*U(1)*Ec8/Ecp/2

```

$$S9 = (1 - E_{c9}/E_{cp}) * A_p * h_p / 2 + A * U(1) * E_{c9}/E_{cp} / 2$$

C  
C *Polozenie osi obojetnej*  
C -----  
C

$$\begin{aligned} h1 &= S1/Ac1 \\ h2 &= S2/Ac2 \\ h3 &= S3/Ac3 \\ h4 &= S4/Ac4 \\ h5 &= S5/Ac5 \\ h6 &= S6/Ac6 \\ h7 &= S7/Ac7 \\ h8 &= S8/Ac8 \\ h9 &= S9/Ac9 \end{aligned}$$

C  
C *Sprowadzony moment bezwladnosci przekroju zespolonego*  
C -----  
C

$$\begin{aligned} I &= B * U(1) ** 3 / 12 && ! \text{ moment bezwladnosci przekroju betonowego} \\ I_p &= b_p * h_p ** 3 / 3 && ! \text{ moment bezwladnosci przekroju prefabrykowanego} \end{aligned}$$

C

$$\begin{aligned} I_{c1} &= (1 - E_{c1}/E_{cp}) * (I_p + A_p * (h_p/2 - h1) ** 2) + \\ &\& (E_{c1}/E_{cp}) * (I + A * (U(1)/2 - h1) ** 2) \\ I_{c2} &= (1 - E_{c2}/E_{cp}) * (I_p + A_p * (h_p/2 - h2) ** 2) + \\ &\& (E_{c2}/E_{cp}) * (I + A * (U(1)/2 - h2) ** 2) \\ I_{c3} &= (1 - E_{c3}/E_{cp}) * (I_p + A_p * (h_p/2 - h3) ** 2) + \\ &\& (E_{c3}/E_{cp}) * (I + A * (U(1)/2 - h3) ** 2) \\ I_{c4} &= (1 - E_{c4}/E_{cp}) * (I_p + A_p * (h_p/2 - h4) ** 2) + \\ &\& (E_{c4}/E_{cp}) * (I + A * (U(1)/2 - h4) ** 2) \\ I_{c5} &= (1 - E_{c5}/E_{cp}) * (I_p + A_p * (h_p/2 - h5) ** 2) + \\ &\& (E_{c5}/E_{cp}) * (I + A * (U(1)/2 - h5) ** 2) \\ I_{c6} &= (1 - E_{c6}/E_{cp}) * (I_p + A_p * (h_p/2 - h6) ** 2) + \\ &\& (E_{c6}/E_{cp}) * (I + A * (U(1)/2 - h6) ** 2) \\ I_{c7} &= (1 - E_{c7}/E_{cp}) * (I_p + A_p * (h_p/2 - h7) ** 2) + \\ &\& (E_{c7}/E_{cp}) * (I + A * (U(1)/2 - h7) ** 2) \\ I_{c8} &= (1 - E_{c8}/E_{cp}) * (I_p + A_p * (h_p/2 - h8) ** 2) + \\ &\& (E_{c8}/E_{cp}) * (I + A * (U(1)/2 - h8) ** 2) \\ I_{c9} &= (1 - E_{c9}/E_{cp}) * (I_p + A_p * (h_p/2 - h9) ** 2) + \\ &\& (E_{c9}/E_{cp}) * (I + A * (U(1)/2 - h9) ** 2) \end{aligned}$$

C  
C *Charakterystyki geometryczne przekroju calego obiektu*  
C -----  
C

$$\begin{aligned} A1 &= A_p \\ A2 &= A_p * (w1 + w2 + w3 + w4 + w5 + w6 + w7 + w8 + w11 + w12 + w13 + w14 + w15) + \\ &\& A_{c1} * (w9 + w10 + w16) \\ A3 &= A_p * (w1 + w2 + w3 + w4 + w5 + w6 + w7 + w12 + w13 + w14) + \\ &\& A_{c1} * (w8 + w11 + w15) + A_{c2} * (w9 + w10 + w16) \\ A4 &= A_p * (w1 + w2 + w3 + w4 + w5 + w6 + w13) + \\ &\& A_{c1} * (w7 + w12 + w14) + A_{c2} * (w8 + w11 + w15) + A_{c3} * (w9 + w10 + w16) \\ A5 &= A_p * (w1 + w2 + w3 + w4 + w5) + A_{c1} * (w13 + w6) + \\ &\& A_{c2} * (w7 + w12 + w14) + A_{c3} * (w8 + w11 + w15) + A_{c4} * (w9 + w10 + w16) \\ A6 &= A_p * (w1 + w2 + w3 + w4) + A_{c1} * w5 + A_{c2} * (w13 + w6) + \\ &\& A_{c3} * (w7 + w12 + w14) + A_{c4} * (w8 + w11 + w15) + A_{c5} * (w9 + w10 + w16) \\ A7 &= A_p * (w1 + w2 + w3) + A_{c1} * w4 + A_{c2} * w5 + A_{c3} * (w13 + w6) + \end{aligned}$$

```

& Ac4*(w7+w12+w14)+Ac5*(w8+w11+w15)+Ac6*(w9+w10+w16)
A8=Ap*(w1+w2)+Ac1*w3+Ac2*w4+Ac3*w5+Ac4*(w13+w6)+
& Ac5*(w7+w12+w14)+Ac6*(w8+w11+w15)+Ac7*(w9+w10+w16)
A9=Ap*w1+Ac1*w2+Ac2*w3+Ac3*w4+Ac4*w5+Ac5*(w13+w6)+
& Ac6*(w7+w12+w14)+Ac7*(w8+w11+w15)+Ac8*(w9+w10+w16)
A10=Ac1*w1+Ac2*w2+Ac3*w3+Ac4*w4+Ac5*w5+Ac6*(w13+w6)+
& Ac7*(w7+w12+w14)+Ac8*(w8+w11+w15)+Ac9*(w9+w10+w16)
A11=A

```

```

C
I1=Ip
I2=Ip*(w1+w2+w3+w4+w5+w6+w7+w8+w11+w12+w13+w14+w15)+
& Ic1*(w9+w10+w16)
I3=Ip*(w1+w2+w3+w4+w5+w6+w7+w12+w13+w14)+
& Ic1*(w8+w11+w15)+Ic2*(w9+w10+w16)
I4=Ip*(w1+w2+w3+w4+w5+w6+w13)+
& Ic1*(w7+w12+w14)+Ic2*(w8+w11+w15)+Ic3*(w9+w10+w16)
I5=Ip*(w1+w2+w3+w4+w5)+Ic1*(w13+w6)+
& Ic2*(w7+w12+w14)+Ic3*(w8+w11+w15)+Ic4*(w9+w10+w16)
I6=Ip*(w1+w2+w3+w4)+Ic1*w5+Ic2*(w13+w6)+
& Ic3*(w7+w12+w14)+Ic4*(w8+w11+w15)+Ic5*(w9+w10+w16)
I7=Ip*(w1+w2+w3)+Ic1*w4+Ic2*w5+Ic3*(w13+w6)+
& Ic4*(w7+w12+w14)+Ic5*(w8+w11+w15)+Ic6*(w9+w10+w16)
I8=Ip*(w1+w2)+Ic1*w3+Ic2*w4+Ic3*w5+Ic4*(w13+w6)+
& Ic5*(w7+w12+w14)+Ic6*(w8+w11+w15)+Ic7*(w9+w10+w16)
I9=Ip*w1+Ic1*w2+Ic2*w3+Ic3*w4+Ic4*w5+Ic5*(w13+w6)+
& Ic6*(w7+w12+w14)+Ic7*(w8+w11+w15)+Ic8*(w9+w10+w16)
I10=Ic1*w1+Ic2*w2+Ic3*w3+Ic4*w4+Ic5*w5+Ic6*(w13+w6)+
& Ic7*(w7+w12+w14)+Ic8*(w8+w11+w15)+Ic9*(w9+w10+w16)
I11=I

```

```

C
C
C Naprezenia w gornych wloknach w stanach mont. i w stanie eksploatacji
C -----

```

```

C
C Naprezenia od obciazen uwzględnianych w stanach montazowych
C

```

```

SIG1=(-X(3)*U(1)/(2*I1)+X(6)/A1)*0.
SIG2=(-X(9)*U(1)/(2*I2)+X(12)/A2)*(w9+w10+w16)
SIG3=(-X(15)*U(1)/(2*I3)+X(18)/A3)*(w8+w9+w10+w11+w15+w16)
SIG4=(-X(21)*U(1)/(2*I4)+X(24)/A4)*(w7+w8+w9+w10+w11+w12+w14+w15+
& w16)
SIG5=(-X(27)*U(1)/(2*I5)+X(30)/A5)*(w6+w7+w8+w9+w10+w11+w12+w13+
& w14+w15+w16)
SIG6=(-X(33)*U(1)/(2*I6)+X(36)/A6)*(w5+w6+w7+w8+w9)
SIG7=(-X(39)*U(1)/(2*I7)+X(42)/A7)*(w4+w5+w6+w7+w8+w9)
SIG8=(-X(45)*U(1)/(2*I8)+X(48)/A8)*(w3+w4+w5+w6+w7+w8+w9)
SIG9=(-X(51)*U(1)/(2*I9)+X(54)/A9)*(w2+w3+w4+w5+w6+w7+w8+w9)
SIG10=-X(57)*U(1)/(2*I10)+X(60)/A10

```

```

C
C Naprezenie od obciazen stalych w stanie eksploatacji
C

```

```

SIG11=-X(63)*U(1)/(2*I11)+X(66)/A11

```

```

C
C Naprezenia od obciazen zmiennych w stanach eksploatacji
C

```



```

SIGK1=-X(69)*U(1)/(2*I11)+X(72)/A11
SIGK2=-X(75)*U(1)/(2*I11)+X(78)/A11
SIGK3=-X(81)*U(1)/(2*I11)+X(84)/A11
SIGK4=-X(87)*U(1)/(2*I11)+X(90)/A11
SIGK5=-X(93)*U(1)/(2*I11)+X(96)/A11

```

```

C
C Wybor bardziej niekorzystnej sytuacji obliczeniowej (montaż płyty
C lub eksploatacja) ze względu na ekstremalne napreżenia sciskające
C i rozciągające oraz wyznaczenie tych napreżeń
C

```

```

SUPG=MAX(SIG10,SIG11+MAX(SIGK1,SIGK2,SIGK3,SIGK4,SIGK5))
INFNG=MIN(SIG10,SIG11+MIN(SIGK1,SIGK2,SIGK3,SIGK4,SIGK5))

```

```

C
C Obliczenie napreżeń w czasie odpowiadającym danemu stanowi pracy
C

```

```

SG1=SIG1
SG2=SIG1+SIG2
SG3=SIG1+SIG2+SIG3
SG4=SIG1+SIG2+SIG3+SIG4
SG5=SIG1+SIG2+SIG3+SIG4+SIG5
SG6=SIG1+SIG2+SIG3+SIG4+SIG5+SIG6
SG7=SIG1+SIG2+SIG3+SIG4+SIG5+SIG6+SIG7
SG8=SIG1+SIG2+SIG3+SIG4+SIG5+SIG6+SIG7+SIG8
SG9=SIG1+SIG2+SIG3+SIG4+SIG5+SIG6+SIG7+SIG8+SIG9
SG10=SIG1+SIG2+SIG3+SIG4+SIG5+SIG6+SIG7+SIG8+SIG9+SIG10
SG11=SIG1+SIG2+SIG3+SIG4+SIG5+SIG6+SIG7+SIG8+SIG9+SIG11

```

```

C
C
C Napreżenia w dolnych włóknach w stanach mont. i w stanie eksploatacji
C -----
C

```

```

C Napreżenia od obciążeń uwzględnianych w stanach montażowych
C

```

```

SID1=(X(3)*U(1)/(2*I1)+X(6)/A1)*0.
SID2=(X(9)*U(1)/(2*I2)+X(12)/A2)*(w9+w10+w16)
SID3=(X(15)*U(1)/(2*I3)+X(18)/A3)*(w8+w9+w10+w11+w15+w16)
SID4=(X(21)*U(1)/(2*I4)+X(24)/A4)*(w7+w8+w9+w10+w11+w12+w14+w15+
& w16)
SID5=(X(27)*U(1)/(2*I5)+X(30)/A5)*(w6+w7+w8+w9+w10+w11+w12+w13+
& w14+w15+w16)
SID6=(X(33)*U(1)/(2*I6)+X(36)/A6)*(w5+w6+w7+w8+w9)
SID7=(X(39)*U(1)/(2*I7)+X(42)/A7)*(w4+w5+w6+w7+w8+w9)
SID8=(X(45)*U(1)/(2*I8)+X(48)/A8)*(w3+w4+w5+w6+w7+w8+w9)
SID9=(X(51)*U(1)/(2*I9)+X(54)/A9)*(w2+w3+w4+w5+w6+w7+w8+w9)
SID10=X(57)*U(1)/(2*I10)+X(60)/A10

```

```

C
C Napreżenie od obciążeń stałych w stanie eksploatacji
C

```

```

SID11=X(63)*U(1)/(2*I11)+X(66)/A11

```

```

C
C Napreżenia od obciążeń zmiennych w stanach eksploatacji
C

```

```

SIDK1=X(69)*U(1)/(2*I11)+X(72)/A11
SIDK2=X(75)*U(1)/(2*I11)+X(78)/A11
SIDK3=X(81)*U(1)/(2*I11)+X(84)/A11

```

```
SIDK4=X(87)*U(1)/(2*I11)+X(90)/A11
SIDK5=X(93)*U(1)/(2*I11)+X(96)/A11
```

```
C
C Wybor bardziej niekorzystnej sytuacji obliczeniowej (montaz plyty
C lub eksploatacja) ze wzgledu na ekstremalne naprezenia sciskajace
C i rozciagajace oraz wyznaczenie tych naprezen
```

```
SUPD=MAX(SID10,SID11+MAX(SIDK1,SIDK2,SIDK3,SIDK4,SIDK5))
INFDD=MIN(SID10,SID11+MIN(SIDK1,SIDK2,SIDK3,SIDK4,SIDK5))
```

```
C
C Obliczenie naprezen w czasie odpowiadajacm danemu stanowi pracy
```

```
SD1=SID1
SD2=SID1+SID2
SD3=SID1+SID2+SID3
SD4=SID1+SID2+SID3+SID4
SD5=SID1+SID2+SID3+SID4+SID5
SD6=SID1+SID2+SID3+SID4+SID5+SID6
SD7=SID1+SID2+SID3+SID4+SID5+SID6+SID7
SD8=SID1+SID2+SID3+SID4+SID5+SID6+SID7+SID8
SD9=SID1+SID2+SID3+SID4+SID5+SID6+SID7+SID8+SID9
SD10=SID1+SID2+SID3+SID4+SID5+SID6+SID7+SID8+SID9+SID10
SD11=SID1+SID2+SID3+SID4+SID5+SID6+SID7+SID8+SID9+SID11
```

```
C
C Wybor najbardziej niekorzystnego okresu pracy ze wzgledu na
C ekstremalne naprezenia sciskajace i rozciagajace w gornych
C i dolnych wloknach lukow oraz wyznaczenie tych naprezen
```

```
SGMAX=MAX(SG1, SG2, SG3, SG4, SG5, SG6, SG7, SG8, SG9, SG9+SUPG)
SDMAX=MAX(SD1, SD2, SD3, SD4, SD5, SD6, SD7, SD8, SD9, SD9+SUPD)
SGMIN=MIN(SG1, SG2, SG3, SG4, SG5, SG6, SG7, SG8, SG9, SG9+INFG)
SDMIN=MIN(SD1, SD2, SD3, SD4, SD5, SD6, SD7, SD8, SD9, SD9+INFDD)
```

```
C
C
C Sformulowanie warunkow typu G
```

```
IF (IPHASE .EQ. 1) THEN
```

```
C
C Wyznaczenie przemieszczen pionowych od obciazen uwzglednianych
C w poszczegolnych stanach pracy
```

```
UG1=X(1)*SQRT(R1**2-T**2)/R1-X(5)*T/R1
UG2=X(7)*SQRT(R1**2-T**2)/R1-X(11)*T/R1
UG3=X(13)*SQRT(R1**2-T**2)/R1-X(17)*T/R1
UG4=X(19)*SQRT(R1**2-T**2)/R1-X(23)*T/R1
UG5=X(25)*SQRT(R1**2-T**2)/R1-X(29)*T/R1
UG6=X(31)*SQRT(R1**2-T**2)/R1-X(35)*T/R1
UG7=X(37)*SQRT(R1**2-T**2)/R1-X(41)*T/R1
UG8=X(43)*SQRT(R1**2-T**2)/R1-X(47)*T/R1
UG9=X(49)*SQRT(R1**2-T**2)/R1-X(53)*T/R1
UG10=X(55)*SQRT(R1**2-T**2)/R1-X(59)*T/R1
UG11=ABS(X(61)*SQRT(R1**2-T**2)/R1-X(65)*T/R1)
```

```
UGK1=ABS(X(67)*SQRT(R1**2-T**2)/R1-X(71)*T/R1)
```

```

UGK2=ABS(X(73)*SQRT(R1**2-T**2)/R1-X(77)*T/R1)
UGK3=ABS(X(79)*SQRT(R1**2-T**2)/R1-X(83)*T/R1)
UGK4=ABS(X(85)*SQRT(R1**2-T**2)/R1-X(89)*T/R1)
UGK5=ABS(X(91)*SQRT(R1**2-T**2)/R1-X(95)*T/R1)

```

```

C
C Wyznaczenie calkowitego przemieszczenia pionowego po zakonczeniu
C montazu lukow

```

```

UGM=ABS(UG1+UG2+UG3+UG4+UG5+UG6+UG7+UG8+UG9)

```

```

C
C Wybor najbardziej niekorzystnego, ze wzgledu na przemieszczenie
C pionowe, ustawienia obciazen zmiennych oraz wyznaczenie tego
C przemieszczenia

```

```

UGK=MAX(UGK1,UGK2,UGK3,UGK4,UGK5)

```

```

C
C Warunki wynikajace ze stanow granicznych uzytkowania

```

```

IF (NEEDG(1) .GT. 0) THEN
  G(1)=UGR1-UGM/1.25
END IF
IF (NEEDG(2) .GT. 0) THEN
  G(2)=UGR1*2/3-UG11/1.25
END IF
IF (NEEDG(3) .GT. 0) THEN
  G(3)=UGR1-UGK/1.25
END IF

```

```

C
C Warunki wynikajace ze stanow granicznych nosnosci

```

```

IF (NEEDG(4) .GT. 0) THEN
  G(4)=fcd+SGMIN
END IF
IF (NEEDG(5) .GT. 0) THEN
  G(5)=fcd+SDMIN
END IF

```

```

C
C Fikcyjne warunki na naprezenia rozciagajace, wprowadzone w celu
C wyprowadzenia z programu wartosci tych naprezen

```

```

IF (NEEDG(6) .GT. 0) THEN
  G(6)=100000.0+SGMAX
END IF
IF (NEEDG(7) .GT. 0) THEN
  G(7)=100000.0+SDMAX
END IF
END IF

```

```

IF (IPHASE .EQ. 2) THEN

```

```

C
C Wyznaczenie przemieszczen pionowych od obciazen uwzglednianych
C w poszczegolnych stanach pracy

```

```

UG1=X(1)*SQRT(R2**2-(T-x2)**2)/R2-X(5)*(T-x2)/R2
UG2=X(7)*SQRT(R2**2-(T-x2)**2)/R2-X(11)*(T-x2)/R2

```

```

UG3=X(13)*SQRT(R2**2-(T-x2)**2)/R2-X(17)*(T-x2)/R2
UG4=X(19)*SQRT(R2**2-(T-x2)**2)/R2-X(23)*(T-x2)/R2
UG5=X(25)*SQRT(R2**2-(T-x2)**2)/R2-X(29)*(T-x2)/R2
UG6=X(31)*SQRT(R2**2-(T-x2)**2)/R2-X(35)*(T-x2)/R2
UG7=X(37)*SQRT(R2**2-(T-x2)**2)/R2-X(41)*(T-x2)/R2
UG8=X(43)*SQRT(R2**2-(T-x2)**2)/R2-X(47)*(T-x2)/R2
UG9=X(49)*SQRT(R2**2-(T-x2)**2)/R2-X(53)*(T-x2)/R2
UG10=X(55)*SQRT(R2**2-(T-x2)**2)/R2-X(59)*(T-x2)/R2
UG11=ABS(X(61)*SQRT(R2**2-(T-x2)**2)/R2-X(65)*(T-x2)/R2)

```

```

C
UGK1=ABS(X(67)*SQRT(R2**2-(T-x2)**2)/R2-X(71)*(T-x2)/R2)
UGK2=ABS(X(73)*SQRT(R2**2-(T-x2)**2)/R2-X(77)*(T-x2)/R2)
UGK3=ABS(X(79)*SQRT(R2**2-(T-x2)**2)/R2-X(83)*(T-x2)/R2)
UGK4=ABS(X(85)*SQRT(R2**2-(T-x2)**2)/R2-X(89)*(T-x2)/R2)
UGK5=ABS(X(91)*SQRT(R2**2-(T-x2)**2)/R2-X(95)*(T-x2)/R2)

```

```

C
C Wyznaczenie calkowitego przemieszczenia pionowego po zakonczeniu
C montazu lukow

```

```

UGM=ABS(UG1+UG2+UG3+UG4+UG5+UG6+UG7+UG8+UG9)

```

```

C
C Wybor najbardziej niekorzystngo, ze wzgledu na przemieszczenie
C pionowe, ustawienia obciazen zmiennych oraz wyznaczenie tego
C przemieszczenia

```

```

UGK=MAX(UGK1,UGK2,UGK3,UGK4,UGK5)

```

```

C
C Warunki wynikajace ze stanow granicznych uzytkowania

```

```

IF (NEEDG(1) .GT. 0) THEN
  G(1)=UGR1-UGM/1.25
END IF
IF (NEEDG(2) .GT. 0) THEN
  G(2)=UGR1*2/3-UG11/1.25
END IF
IF (NEEDG(3) .GT. 0) THEN
  G(3)=UGR1-UGK/1.25
END IF

```

```

C
C Warunki wynikajace ze stanow granicznych nosnosci

```

```

IF (NEEDG(4) .GT. 0) THEN
  G(4)=fcd+SGMIN
END IF
IF (NEEDG(5) .GT. 0) THEN
  G(5)=fcd+SDMIN
END IF

```

```

C
C Fikcyjne warunki na naprezenia rozciagajace, wprowadzone w celu
C wyprowadzenia z programu wartosci tych naprezen

```

```

IF (NEEDG(6) .GT. 0) THEN
  G(6)=100000.0+SGMAX
END IF
IF (NEEDG(7) .GT. 0) THEN

```

```

          G(7)=100000.0+SDMAX
        END IF
      END IF
C
      RETURN
      END
C
C
C
C
C
C
C =====
      SUBROUTINE USRNEC(IPHASE, NHNLN, NEEDH, NX, LU, LP, X, U, P, T, H,
&                      &                      IFAIL)
C =====
C
C                      WIĘZY DWUSTRONNE
C                      =====
C
C      Obliczenie funkcji nieliniowych równań opisujących więzy
C
C      0 = H(X,U,P,T)      w czasie T i w fazie IPHASE.
C
C      Parametry WEJŚCIA:
C      -----
C      IPHASE - numer aktualnej fazy (integer)
C              1 <= IPHASE <= M1
C      NHNLN  - numer nieliniowego równania więzów
C              w fazie IPHASE (integer)
C      NEEDH  - tylko gdy NEEDH(I) > 0 I-te nieliniowe równania
C              więzów w fazie IPHASE powinny być rozwiązywane
C              (integer array)
C      NX     - liczba zmiennych stanu (integer)
C      LU     - liczba zmiennych sterujących (integer)
C      LP     - liczba parametrów sterowania (integer)
C      X      - zmienna stanu w czasie T (real array)
C      U      - zmienna sterująca w czasie T (real array)
C      P      - parametr sterowania (real array)
C      T      - czas, w którym H powinna być obliczana (real)
C
C      Parametry WYJŚCIA:
C      -----
C      H      - obliczona wartość (tylko) potrzebnego komponentu
C              nieliniowego równania opisującego więzy w czasie T
C              (real array)
C      IFAIL  - (optionalnie)
C              IFAIL < 0 na wyjściu oznacza błąd (integer)
C
C      -----
C
      IMPLICIT NONE
      INTEGER  NHNLN, NX, LU, LP, IPHASE, NEEDH(NHNLN), IFAIL
      DOUBLE PRECISION T, X(NX), U(LU), P(LP), H(NHNLN)
C
      RETURN

```

**END**

```
C
C
C
C
C
C
C =====
C SUBROUTINE  USRREV (NSMAX, IPHASE, I, NS, XS, YS, KTYP)
C =====
```

```
C
C
C
C
C
C -----
C
C
C IMPLICIT NONE
C INTEGER      IPHASE, I, NS, NSMAX
C REAL         XS(NSMAX), YS(NSMAX)
C CHARACTER*(*) KTYP
```

NS=0

**RETURN**  
**END**

```
C
C
C
C
C
C =====
C SUBROUTINE USRREA( INDX, IORD, ISTAGE, NSMAX, NS, XS, YS, KTYP)
C =====
```

```
C
C
C
C
C
C -----
C
C
C IMPLICIT NONE
C INTEGER      INDX, IORD, ISTAGE, NSMAX, NS
C REAL         XS(*),YS(*)
C CHARACTER*8  KTYP
```

NS=0

**RETURN**  
**END**

```
C
C
C
C
C
C =====
C SUBROUTINE USRREM( IWHT, INDX, IORD, IPHASE,
C &                  NSMAX, NS, XS, YS, KTYP)
```

```

C =====
C
C
C
C
C
C -----
C
C   IMPLICIT NONE
C   INTEGER      IWHAT, INDX, IORD, IPHASE, NS, NSMAX
C   REAL XS(*),YS(*)
C   CHARACTER*8  KTYP
C
C   NS=0
C
C   RETURN
C   END
C
C
C
C
C =====
C   SUBROUTINE USRNCG( IWHAT, INDX, IORD, IPHASE,
C   &                  NX, LU, LP, X, U, P, T, NGRD)
C =====
C
C
C
C
C -----
C
C   IMPLICIT NONE
C   INTEGER IWHAT, IORD, IPHASE, INDX, NX, LU, LP, NS
C   DOUBLE PRECISION X(*), U(*), P(*), T, NGRD(*)
C
C   NS=0          ! co to jest?
C
C   RETURN
C   END
C
C
C
C
C =====
C   SUBROUTINE USRFCN(IPHASE, NEEDFCN, NX, LU, LP, X, U, P, T,
C   &                  LAM, MUNIC, MUNEC, MUB, FCN)
C =====
C
C
C
C
C -----
C
C   IMPLICIT NONE
C   INTEGER NX, LU, LP, IPHASE, NEEDFCN(*)
C   DOUBLE PRECISION T, X(NX), U(LU), P(LP), LAM(*), MUNIC(*),

```

```
&                MUNEC(*), MUB(*), FCN(*)
C
C      IF (IPHASE .LE. 0) THEN
C      KOMENTARZ
C
C      IPHASE=0
C      GOTO 99999
C      END IF
99999 RETURN
C      END
```