

- PN-EN 1992-2. *Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 2. Mosty z betonu. Obliczanie i reguły konstrukcyjne.*
- PN-EN 1993-1-1. *Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1. Reguły ogólne i reguły dla budynków.*
- PN-EN 1993-2. *Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 2. Mosty stalowe.*
- PN-EN 1997-1. *Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne. Część 1. Zasady ogólne.*

Zasady projektowania obiektów mostowych według Eurokodów zostały szczegółowo opisane w pracy pod redakcją Tomasza Siwowskiego [84] w związku z czym nie będą tu szerzej omawiane.

### 2.3.2. Sytuacje obliczeniowe

#### Zakres obliczeń

W projektowaniu mostów skrzynkowych z betonu sprężonego, a w zasadzie wszystkich mostów, należy przeanalizować trzy podstawowe sytuacje obliczeniowe wymagane przez obowiązujący obecnie system norm (Eurokody):

- a) przejściową (zwaną dawniej stanem montażowym), w której analizuje się konstrukcję w fazie budowy;
- b) trwałą (zwaną dawniej stanem użytkowania), która dotyczy normalnej eksploatacji ukończonego obiektu;
- c) wyjątkową – dotyczącą wyjątkowych sytuacji, które mogą się zdarzyć w czasie eksploatacji obiektu, na przykład uderzenie pojazdów lub statków o przęsła lub podpory, lokalne uszkodzenia konstrukcji, przejazdy ponadnormatywne, wykołajenie pociągu.

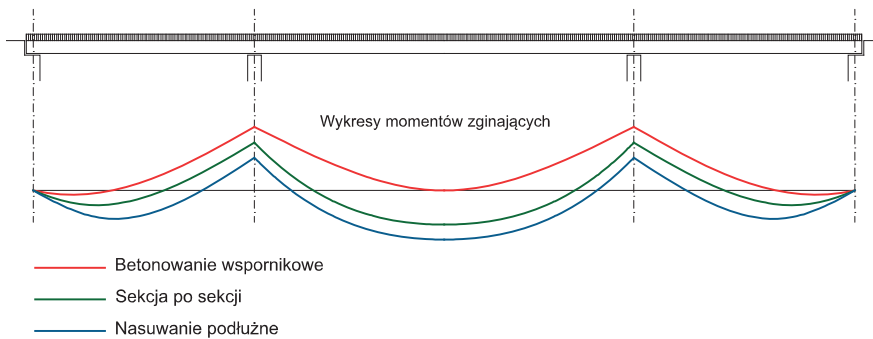
#### Stany montażowe – sytuacja przejściowa

Obecnie rzadko konstrukcje mostowe wykonywane są w jednym etapie. Nawet w projektowaniu dwuprzęsłowego, uciążłonego wiaduktu nad autostradą budowanego z wykorzystaniem belek prefabrykowanych trzeba analizować fazy przejściowe. Duże wieloprzęsłowe ciągle obiekty mostowe buduje się etap po etapie. W związku z tym przy przechodzeniu z etapu do etapu zmienia się schemat statyczny konstrukcji oraz jej masa.

Na rysunku 2.28 przedstawiono wykresy momentów w moście trójprzęsłowym wywołane jego ciężarem własnym, zależne od stosowania różnych metod budowy. W przypadku nasuwania podłużnego po zakończeniu procesu nasuwania wykres momentów wywołanych ciężarem własnym jest taki sam, jaki wystąpiłby, gdyby obiekt został wykonany jednoetapowo na pełnym rusztowaniu.

W przypadku realizacji obiektu metodą sekcja po sekcji (trzy sekcje) otrzymanoby większe momenty podporowe, a mniejsze przęsłowe. Z wykorzystaniem metody betonowania wspornikowego zostaną wygenerowane tylko momenty ujemne, zdecydowanie większe niż w przypadku pozostałych metod.

**Ten prosty przykład pokazuje tylko efekt końcowy, po zakończeniu budowy, a należy pamiętać, że w procesie realizacji w niektórych przekrojach konstrukcji mogą wystąpić siły wewnętrzne znacznie większe od końcowych. Stany montażowe konstrukcji muszą być starannie analizowane, ponieważ zaniedbania w tym obszarze doprowadziły w przeszłości do wielu awarii i katastrof [67].**



**Rysunek 2.28.** Wykresy momentów w moście trójprzęsłowym wywołane ciężarem własnym, w zależności od metody jego realizacji

W stanach montażowych należy brać pod uwagę następujące obciążenia i oddziaływania:

- ciężar własny konstrukcji; przy czym ciężar objętościowy betonu zależy głównie od rodzaju kruszywa grubego użytego do jego produkcji i może się wahać od  $23,5 \text{ kN/m}^3$  (kruszywa granitowe) do  $26,0 \text{ kN/m}^3$  (kruszywa bazaltowe); z tego powodu, aby wykonać poprawne obliczenia, **należy ustalić rzeczywistą masę używanego betonu**;
- obciążenia montażowe specyficzne dla przyjętej metody budowy;
- nierównomierne osiadanie podpór;
- parcie wiatru;
- nierównomierne pola temperatur;
- siły wywołane sprzężeniem konstrukcji o wielkości odpowiadającej specyfice metody budowy.

### Sytuacja trwała – stan użytkowania

W stanie użytkowania należy analizować konstrukcję kompletną po zakończeniu procesu wznoszenia, biorąc pod uwagę:

- „zamrożony” stan wyężenia konstrukcji po osiągnięciu jej docelowego ukształtowania;
- obciążenia wywołane wyposażeniem obiektu;
- obciążenia użytkowe przewidziane dla projektowanego obiektu;
- docelowe wartości parcia wiatru, nierównomierności osiadania podpór i gradienty temperatury;
- siły wywołane uzupełniającym sprzężeniem konstrukcji.

W betonowych konstrukcjach sprężonych budowanych sukcesywnie z uwagi na zachodzące zjawiska reologiczne następuje redystrybucja sił wewnętrznych i przyrost przemieszczeń w czasie [15, 26, 68, 72]. Sprawdzenie stanów granicznych należy wykonać dla momentu początkowego (oddanie obiektu do eksploatacji) i dla przewidywanego okresu zakończenia eksploatacji, czyli na przykład po 100 latach.

**Należy podkreślić, że wymiary wykonanych konstrukcji przeseł (grubości płyt i szerokości środników) są zazwyczaj większe (o kilka milimetrów) od wielkości**

projektowych, w związku z tym wykonane konstrukcje są zazwyczaj o 2–3% cięższe niż wynikałoby to z rysunków gabarytowych, co warto uwzględnić w projekcie.

### Sytuacja wyjątkowa

W tej fazie należy dokonać sprawdzenia konstrukcji na wystąpienie obciążeń, które mogą się pojawić epizodycznie. Przy sprawdzeniu na sytuacje wyjątkowe dopuszcza się zwykle mniejszy zapas bezpieczeństwa niż w sytuacji trwałej.

W rozdziałach 3, 4 i 5 szczegółowo omówiono zasady projektowanych konstrukcji wykonywanych różnymi metodami.

## 2.4. Modele obliczeniowe stosowane do analizy dźwigarów skrzynkowych

### 2.4.1. Struktura modeli

Przy komputerowym wspomaganii projektowania konstrukcji mostowych wykorzystuje się ich dyskretne modele obliczeniowe [35]. Schematycznie przebieg procesu modelowania i analizy konstrukcji pokazano na rys. 2.29. Wyróżnić można trzy podstawowe elementy modelu obliczeniowego:

- model geometrii – sposób odwzorowania układu geometrycznego obiektu mostowego;
- model materiału – charakterystyka materiału konstrukcyjnego;
- model obciążeń – sposób przedstawiania obciążeń.

Tak zdefiniowany model ma charakter ogólny i może być wykorzystany przy zastosowaniu różnych metod obliczeniowych.

Następnym działaniem, po określeniu wszystkich składników modelu obliczeniowego, jest sformułowanie numerycznego opisu przyjętego modelu. Etap ten wiąże się już z ustaleniem konkretnej metody analizy i zależy od możliwości oprogramowania, którym dysponuje projektant. Ostatecznym wynikiem dyskretyzacji jest przygotowanie danych do analizy numerycznej (takich jak: model geometrii, charakterystyki zastosowanych elementów czy zestawienie obciążeń).

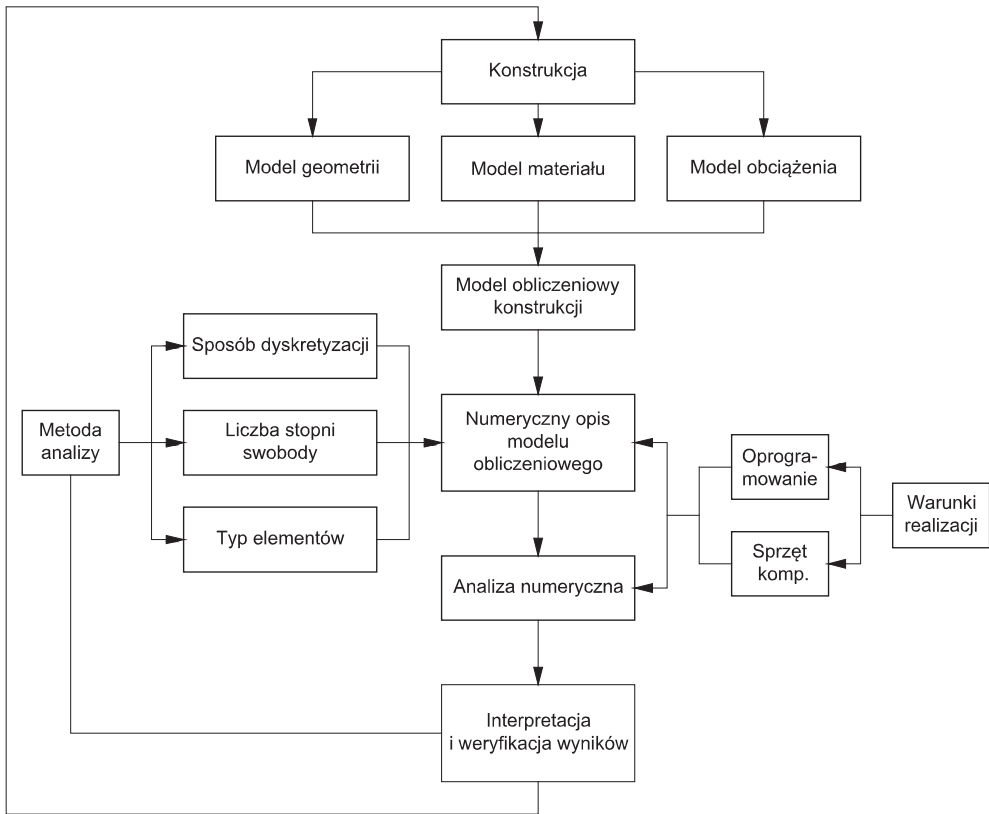
Po przeprowadzeniu obliczeń następuje interpretacja i weryfikacja wyników otrzymanych z analizy modelu dyskretnego w nawiązaniu do rzeczywistej konstrukcji. W większości przypadków analizowane zagadnienia statyczne czy dynamiczne mogą być opisane równaniem różniczkowym w przestrzeni przemieszczeń:

$$\mathbf{M} \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} + \mathbf{C} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{K} \mathbf{u} + \mathbf{P} = 0, \quad (2.1)$$

gdzie:  $\mathbf{M}$  – macierz mas,  $\mathbf{C}$  – macierz tłumienia,  $\mathbf{K}$  – macierz sztywności konstrukcji,  $\mathbf{u}$  – wektor przemieszczeń w układzie dyskretnym,  $t$  – czas,  $\mathbf{P}$  – wektor obciążeń.

W przypadku analizy statycznej wartość przemieszczeń nie zależy od czasu, stąd ogólny układ równań równowagi przyjmuje postać:

$$\mathbf{K} \mathbf{u} + \mathbf{P} = 0. \quad (2.2)$$



Rysunek 2.29. Schemat procesu budowy modelu i analizy konstrukcji mostowych [35]

Rozwiązanie powyższego układu równań daje wartości przemieszczeń w układzie dyskretnym (zatem tylko w wybranych punktach wynikających z wcześniejszego podziału konstrukcji na elementy). Wartości żądanych wielkości w dowolnym punkcie konstrukcji uzyskuje się z zależności:

- dla przemieszczeń

$$\mathbf{f} = \mathbf{N} \mathbf{u}, \quad (2.3)$$

- dla odkształceń

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B} \mathbf{u}, \quad (2.4)$$

- dla naprężeń

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D} \mathbf{u}, \quad (2.5)$$

gdzie:  $\mathbf{f}$  – macierz przemieszczeń,  $\boldsymbol{\varepsilon}$  – macierz odkształceń,  $\boldsymbol{\sigma}$  – macierz naprężeń,  $\mathbf{N}$  – macierz funkcji opisujących przemieszczenie w dowolnym punkcie konstrukcji w zależności od przemieszczeń w układzie dyskretnym (macierz aproksymacyjna),  $\mathbf{B}$  – macierz wiążąca przemieszczenia i odkształcenia (macierz odkształceń),