

## NOWOCZESNA PREFABRYKACJA

Cykl artykułów, poświęconych współczesnej, nowoczesnej prefabrykacji, tworzony jest we współpracy ze Stowarzyszeniem Producentów Betonów. Cykliczna rubryka ma na celu promocję korzyści ze stosowania prefabrykacji betonowej, możliwości pod kątem budownictwa przemysłowego, mieszkaniowego i drogowo-mostowego oraz innych zastosowań, promocję innowacji w prefabrykacji, przybliżenie zasad projektowania konstrukcji prefabrykowanych i ich elementów, a także prezentację wybranych obiektów.



STOWARZYSZENIE PRODUCENTÓW BETONÓW  
Rok założenia 1994  
[www.s-p-b.pl](http://www.s-p-b.pl)

### PARTNERZY TEMATU

 **BETARD**

 **Pekabex**

 **MASTER BUILDERS SOLUTIONS**

 **BASF**  
We create chemistry

# PREFABRYKACJA BETONOWA

**Część 10.**

## Podstawy wymiarowania elementów

**dr inż. Grzegorz Adamczewski, Politechnika Warszawska**  
**dr hab. inż. Piotr Woyciechowski, prof. PW, Politechnika Warszawska**

Od strony obliczeniowej projektowanie elementów prefabrykowanych zasadniczo nie różni się od projektowania konstrukcji żelbetowej wg EC2. Istotną różnicę stanowi jednak zmiana schematów statycznych w czasie od produkcji i transportu elementu przez jego montaż i uzyskanie docelowego stanu w konstrukcji.

Współczesna prefabrykacja betonowa jest w pełni predestynowana do wznoszenia trwałych i funkcjonalnych obiektów mieszkaniowych, w tym także takich o nietuzinkowych walorach architektonicznych.

### Przemysłane koncepcje

W celu wykorzystania pełnego potencjału tej technologii należy planować inwestycje począwszy już od samej koncepcji, uwzględniając wykorzystanie prefabrykatów – spowoduje to zwiększenie konkurencyjności cenowej względem technologii tradycyjnej oraz pozwoli skrócić czas realizacji przy zachowaniu odpowiedniego poziomu wymagań użytkowych. Wykonanie samego projektu jest dzisiaj ułatwione dzięki narzędziom BIM, dostępnym katalogom elementów, jakimi dysponują producenci prefabrykatów, a także wyspecjalizowanym komórkom projektowym istniejącym przy zakładach prefabrykacji.

Istotnym aspektem jest również sposób planowania inwestycji – projekty przewidziane do realizacji w technologii monolitycznej, które są adaptowane do wykonania z prefabrykatów,

stają się często bardzo kosztowne, ponieważ wymuszają na producencie elementów/projektancie wykonanie dużej liczby indywidualnych form do elementów. Takie działanie buduje negatywne postrzeganie prefabrykacji jako technologii drogiej i niepraktycznej, podczas gdy faktyczna wysokość kosztów wynika z realizacji spersonalizowanego jednostkowego projektu. Przygotowanie natomiast projektu od samego początku przewidzianego „pod prefabrykację” pozwala uniknąć wysokich kosztów adaptacji i wykorzystać pełne atuty tej technologii. Pomimo to wielu klientów prywatnych decyduje się jednak ponieść zwiększone koszty przeprojektowania konstrukcji przeznaczonej do wykonania w technologii monolitycznej na realizację z prefabrykatów, ponieważ w całkowitym bilansie kosztów uwzględnić należy jeszcze znaczne skrócenie czasu realizacji oraz obniżone koszty montażu względem łącznego kosztu pracy pełnej ekipy budowlanej. Zastosowanie prefabrykacji betonowej ze względu na jej charakter – dostarczania gotowych elementów z fabryki – przyczynia się także do poprawy bezpieczeństwa i organizacji pracy na budowach.

### Podstawy projektowania

Geometria obiektu uwarunkowana jest wieloma kwestiami użytkowymi, technicznymi oraz ekonomicznymi. Wstępny dobór geometrii obiektu zależy w szczególności od przeznaczenia obiektu i programu funkcjonalno-użytkowego PFU, wytycznych estetycznych oraz przewi-

Wymiarowanie elementów prefabrykowanych wykonywane jest zgodnie z zasadami obliczeń dla konstrukcji żelbetowych i sprężonych, według EC 2.

dywanej modernizacji (możliwości adaptacji pod potrzeby najemców) i dalszej rozbudowy w przyszłości (a także przewidywanej długości życia obiektu). Projektant musi wziąć pod uwagę przewidywane obciążenia stałe lub zmienne, a także sytuacje wyjątkowe, takie jak:

- wybuch składowanych materiałów (gazy, pyły),
- pożary,
- podmycia fundamentów,
- awarie w procesie technologicznym,
- uderzenia pojazdów (np. wózków widłowych) w elementy konstrukcyjne obiektu,
- zjawiska sejsmiczne, huragany, powódzie itp.

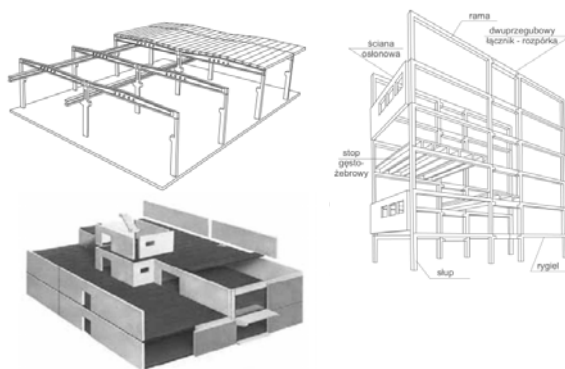
Istotne znaczenie mają także warunki gruntowo-wodne, które w pewnym stopniu decydują o wyborze schematu statycznego. Dobre warunki gruntowo-wodne sprzyjają układom sztywnym, nawet w przypadku obiektów dość wysokich. W przypadku przewidywanych nierównomiernych osiadań podłoża korzystniejsze są układy statycznie wyznaczalne, w których przemieszczenie jednej podpory nie powoduje stanu awaryjnego, a jedynie deformację ustroju. Szczególne uwarunkowania występują w obszarach szkód górniczych, w których zaleca się stosowanie układów trójprzegubowych.

Typowe uwarunkowania wynikają z planowanej ilości kondygnacji, lokalizacji oraz warunków gruntowo-wodnych, kształtu i wielkości działki, a także obowiązujących przepisów – przykładowo wzrost kosztów konstrukcji może być związany z kosztami transportu elementów ponadgabarytowych. Wykonanie samych elementów wymaga analizy możliwości produkcyjnych, transportowych i montażowych, a także czasu (długość realizacji) oraz okresu realizacji (zima, lato).

Istotnym elementem wstępnego projektowania obiektu jest analiza obciążeń. Obciążenia stałe wynikają z ciężaru własnego elementów konstrukcyjnych i stałego wyposażenia. Obciążenia zmienne szczególnie istotnie wpływają na dobór geometrii obiektu. Obejmują one obciążenia użytkowe – w przypadku obiektów przemysłowych często dynamiczne, obciążenia śniegiem i wiatrem (związane ze strefą klimatyczną, niepomijalne w obiektach przemysłowych w odróżnieniu od mieszkalnych) oraz związane z innymi oddziaływaniami, takimi jak temperatura czy agresja chemiczna (ciecze, opary, gazy). Warto zwrócić uwagę, że intensywne zapylenie związane z przebiegiem działań technologicznych w obiekcie przemysłowym może powodować wzrost obciążeń elementów na skutek osiadania pyłów na konstrukcji (np. obiekty elektrociepłowni, w których odbywa się pręmał węgla).

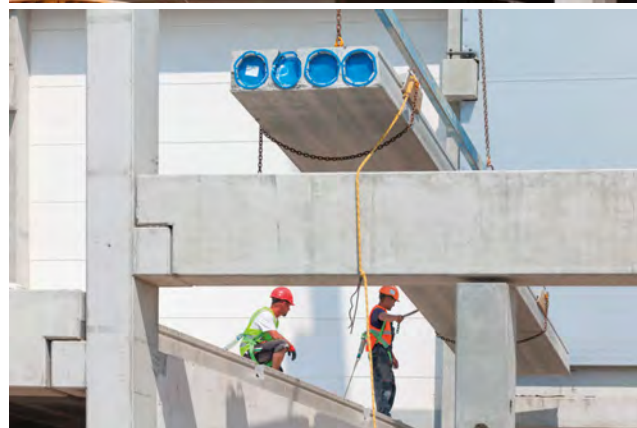
### Problemy i rozwiązania projektowe

Obiekty prefabrykowane stanowią niezwykle obszerną i różnorodną grupę obiektów budowlanych. Mogą to być typowe obiekty mieszkalne, hale produkcyjne oraz magazynowe (rys. 1.), ale także wielkie obiekty energetyczne, cementownie czy też oczyszczalnie ścieków. Z uwagi na układ konstrukcyjny obiekty te dzieli się na te o konstrukcji szkieletowej i o konstrukcji z elementów płytowych.



Rys. 1. Budynki przemysłowe lub mieszkalne o konstrukcji z elementów prętowych i płytowych

Przygotowanie projektu od samego początku przewidzianego „pod prefabrykację” pozwala uniknąć wysokich kosztów adaptacji i wykorzystać pełne atuty tej technologii.



Fot. arch. BEPARD

Wśród obiektów o konstrukcji szkieletowej najczęściej spotykane w praktyce są jednokondygnacyjne hale przemysłowe i magazynowe. Typowa wysokość hali produkcyjnej lub magazynowej wynosi od 5 m do 20 m. Typowa rozpiętość nawy hali to od 12 do 30 m, przy czym największe realizowane w Polsce szerokości naw prefabrykowanych hal sięgały ponad 40 m.

Obiekty przemysłowe generują w projektowaniu szereg indywidualnych problemów związanych z przeznaczeniem obiektu, w tym specyfiką branży przemysłowej.

Typowe problemy, z jakimi w tym wypadku musi sobie poradzić projektant, to:

- znaczne obciążenia, także jeśli chodzi o konstrukcję dachu;
- zapewnienie stateczności konstrukcji w czasie transportu, montażu i w sytuacji docelowej;
- przebieg transportu i realizacja montażu;
- podwyższone wymagania w zakresie odporności ogniowej;
- złożone i ostre oddziaływania agresywne środowiska, w tym wykraczające poza standardowy zakres klas ekspozycji betonu;
- narażenie na działanie temperatury (w tym wysokiej, niskiej, szokowo zmiennej);
- konieczność łączenia różnych technologii wznoszenia obiektu (szybkość i płynność montażu);
- realizacja dużych obiektów z wieloma podwykonawcami i technologiami, uwzględnienie robót branżowych.

Wykorzystanie rozwiązań oferowanych przez prefabrykację betonową pozwala w wielu przypadkach optymalnie rozwiązać wskazane problemy, zarówno w aspekcie ekonomicznym, jak i funkcjonalnym, pod warunkiem że wykorzystanie prefabrykacji będzie uwzględnione już w fazie koncepcyjnej projektowania obiektu, a projektowa-

Obiekty o konstrukcji szkieletowej to najczęściej jednokondygnacyjne hale przemysłowe i magazynowe.

## GEOMETRIA OBIEKTU/WSKAZÓWKI PROJEKTOWE

1. W przypadku przewidywanych nierównomiernych osiadań podłoża korzystniejsze są układy statycznie wyznaczalne, w których przemieszczenie jednej podpory nie powoduje stanu awaryjnego, a jedynie deformację ustroju.
2. Na obszarach szkód górniczych zaleca się stosowanie układów trójprzegubowych.

nie będzie miało charakter kompleksowy, z wykorzystaniem wiedzy i wsparcia merytorycznego producentów prefabrykatów.

W artykule przedstawiony zostanie tok postępowania projektowego na przykładzie elementów prętowych. W praktyce ułatwieniem są tablice i nomogramy do wstępnego doboru elementów, dostępne w bazach danych producentów prefabrykatów. Wraz z rozwojem technologii BIM projektanci, kosztorysanci oraz architekci będą zapewne dysponować coraz szerszymi bibliotekami gotowych elementów wraz z ich pełną charakterystyką konstrukcyjną i montażową, co uprości projektowanie.

## Wymiarowanie elementów – metody obliczeń i dobór elementów

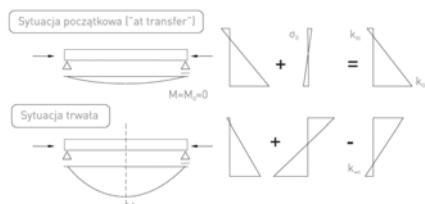
Wymiarowanie elementów prefabrykowanych wykonywane jest zgodnie z zasadami obliczeń dla konstrukcji żelbetonowych i sprężonych, według EC 2. Specyfika wymiarowania związana jest z możliwymi zmianami schematu statycznego elementu na etapie produkcji, transportu, montażu i eksploatacji. Poniżej przedstawiono tok postępowania przy wymiarowaniu betonowej belki sprężonej oraz słupa żelbetowego jako typowych elementów w asortymencie elementów prętowych. Kolejną istotną kwestią, różniącą projektowanie prefabrykatów od konstrukcji monolitycznych, są tolerancje montażowe wymagane do prawidłowego montażu konstrukcji prefabrykowanej.

Fot. arch. Pełakobex



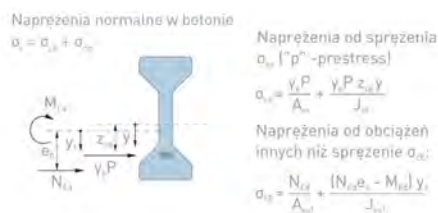
## Wymiarowanie belek sprężonych

Zróżnicowanie rodzaju i wielkości obciążenia oddziałującego na element sprężony prowadzi do różnic w sposobach analizy, dlatego wyróżnia się następujące sytuacje: trwałą oraz początkową. W sytuacji początkowej uwzględniane są obciążenia zewnętrzne, działające w chwili sprężenia (np. ciężar własny elementu). Sprężenie takie traktowane jest jako obciążenie zewnętrzne. W sytuacji trwałej uwzględnia się wszystkie obciążenia stałe, technologiczne i klimatyczne.

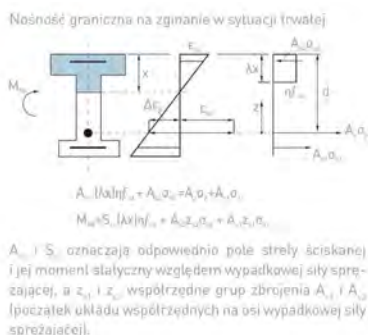


Rys. 2. Zasada pracy belki sprężonej w sytuacji początkowej i trwałej

Zasady obliczania naprężenia normalnego w betonie w dowolnym punkcie przekroju wywołane siłą sprężającą i momentem zginającym można określić następująco:



Określenie nośności granicznej na zginanie w sytuacji trwałej polega na sporządzeniu bilansu sił przekrojowych oraz wyznaczeniu maksymalnego momentu statycznego MRd, przyjmując, że ciągną sprężające mogą być reprezentowane przez ich wypadkową:



## Wymiarowanie słupów żelbetowych

W trakcie wymiarowania słupa żelbetowego poddanego mimośrodowemu ściskaniu sprawdzane są niezależnie trzy przekroje na wysokości słupa: górny, dolny oraz położony w części środkowej. Dokładne położenie tego przekroju jest określone najczęściej poprzez moment środkowy według wytycznych normowych.

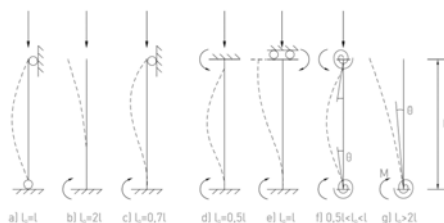
W zależności od położenia przekroju środkowego oraz tego, czy słup jest zamocowany w sposób przesuwany, czy nieprzesuwany, wnioskujemy, czy w danym przekroju uwzględniony zostanie wpływ efektów drugiego rzędu (oczywiście jeśli smukłość słupa przekracza normową wartość graniczną).

Metody obliczeń według EC2 obejmują metodę ogólną, opartą na nieliniowej analizie drugiego rzędu, oraz dwie metody uproszczone: metodę opartą na nominalnej sztywności oraz na nominalnej krzywiźnie.

Najczęściej przyjętym schematem w większości norm żelbetowych jest:

- dla konstrukcji o węzłach nieprzesuwanych – wpływ smukłości można uwzględnić w środkowym przekroju słupa; dla przekrojów na końcach słupa nie uwzględnia się wpływu smukłości;

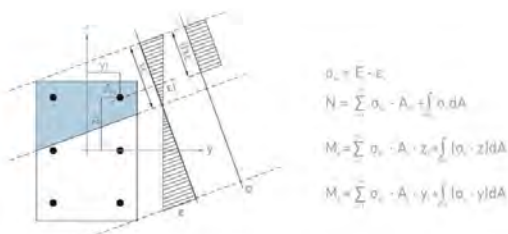
- dla konstrukcji o węzłach przesuwnych – wpływ smukłości uwzględnia się jednakowo dla każdego przekroju słupa.



Rys. 3. Elementy wydzielone – przykłady różnych postaci wybočenja i odpowiadających im efektywnych długości

Dla tak rozumianych trzech przekrojów przeprowadzane jest wymiarowanie. Obliczone zbrojenie musi zapewnić spełnienie nośności we wszystkich trzech przekrojach słupa dla każdej z kombinacji obciążeń.

Kombinacja wymiarująca rozumiana jest jako zestaw kombinacji obciążeń wraz z położeniem przekroju, dla której to pary występuje największe wyężenie. Trzem wymiarowanym przekrojom odpowiadają trzy zestawy sił (tj. siły osiowe, momenty i ew. siły poprzeczne) dla każdej kombinacji w tabeli definicji obciążeń. Obliczanie nośności słupa w przypadku dwukierunkowego zginania przebiega zgodnie z ogólnym schematem przedstawionym na rysunku poniżej, obrazującym równania równowagi sił normalnych oraz momentów w obu kierunkach:



Rys. 4. Prostokątny wykres naprężen: w szczególnych przypadkach możliwe jest także zastosowanie wykresu paraboliczno-prostokątnego

W praktyce ułatwieniem dla projektanta są tablice i nomogramy do wstępnego doboru elementów, dostępne w bazach danych producentów prefabrykatów.

## Podsumowanie

Od strony obliczeniowej projektowanie elementów prefabrykowanych zasadniczo nie różni się od projektowania konstrukcji żelbetowej wg EC2. Istotną różnicę stanowi natomiast zmiana schematów statycznych w czasie od produkcji oraz transportu elementu przez jego montaż i uzyskanie docelowego stanu w konstrukcji. Wymiarowanie elementów musi obejmować analizę wszystkich występujących układów statycznych, w tym również w sytuacjach wyjątkowych. Wstępny dobór elementów do konstrukcji z prefabrykatów jest na etapie koncepcyjnym znacznie ułatwiony dzięki katalogom elementów wraz z wykazem ich charakterystyk. Projekt wykonawczy konstrukcji jest każdorazowo przeliczany i weryfikowany przez projektanta, który analizuje schematy statyczne konstrukcji z wykorzystaniem charakterystyk gotowych elementów dostarczonych przez ich producenta. ■

Wykorzystano materiały Stowarzyszenia Producentów Betonów: Zeszyt 2, część 2 „Prefabrykacja – jakość trwałość, różnorodność – konstrukcje szkieletowe realizowane z elementów prętowych” oraz Instrukcję AUTODESKU – Pomoc do programu Robot Structural Analysis Professional.