

Przekroje zaawansowane

Modelowanie złożonych przekrojów w SectionPro

Zastosowanie do przekroju podporowego sprężonego mostu skrzynkowego

BridgeKernel · 2026

Wstęp

Standardowe przekroje belek, słupów i ścian są zazwyczaj opisywane za pomocą jednego konturu i jednolitego zbrojenia. Prawdziwe konstrukcje często łączą w sobie kilka materiałów, puste przestrzenie, oddzielne warstwy zbrojenia, ciągną sprężające lub osadzone elementy stalowe. Ich analiza wymaga reprezentacji, która zachowuje zarówno geometrię, jak i prawo konstytutywne każdego komponentu.

Przekroje zaawansowane w SectionPro odpowiadają na tę potrzebę. Przekrój zaawansowany składa się z domen geometrycznych, zbrojenia pasywnego, stali sprężającej, kształtowników stalowych i cienkich blach. Każdemu komponentowi przypisuje się model materiałowy używany w analizach. Ten sam opis służy następnie do obliczania charakterystyk przekroju, weryfikacji naprężeń i odkształceń pod zadany wektor sił przekrojowych, obliczania szerokości rys oraz wyznaczania obszarów interakcji.

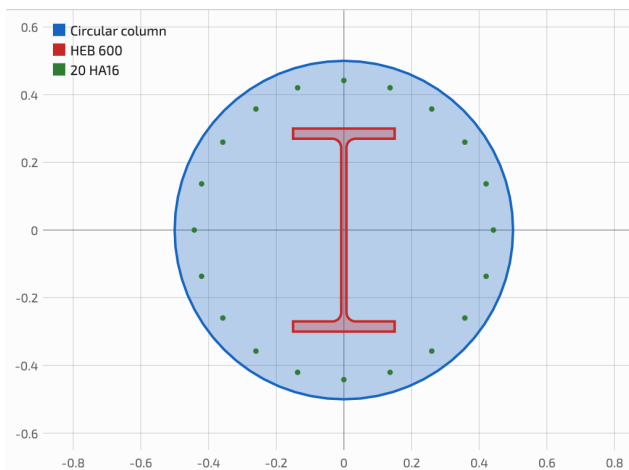
W artykule najpierw przedstawiono model danych przekroju zaawansowanego. Następnie jako przykład wykorzystano miarodajny przekrój podporowy dźwigara skrzynkowego z betonu sprężonego. Geometria ta łączy w jednym modelu dużą pustkę, zbrojenie rozmieszczone przy kilku powierzchniach oraz grupy cięgien.

Definicja przekroju zaawansowanego

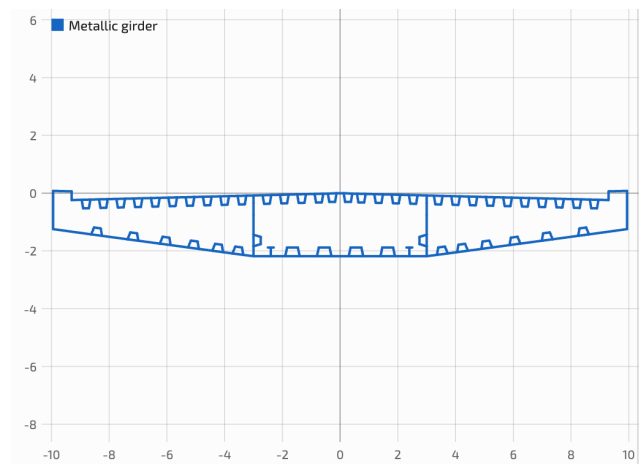
Przekrój zaawansowany łączy kilka grup obiektów mechanicznych. Solver zachowuje ich położenie w układzie współrzędnych przekroju i wyznacza ich udział na podstawie modelu materiałowego przypisanego do każdego obiektu.

- Domena geometryczna, czyli GeoDomain, jest zdefiniowana przez kontur zewnętrzny i może zawierać kilka pustek. Jeden przekrój może zawierać kilka domen, każdą z własnym modelem materiałowym.
- Zbrojenie pasywne jest zorganizowane w niezależne warstwy. Każdy pręt ma swoją pozycję, średnicę i prawo dotyczące stali, co pozwala na przedstawienie oddzielnych warstw, ścian i gatunków stali.

- Stal sprężającą grupuje się w rodziny cięgien zdefiniowane przez położenie, pole przekroju, parametry przyczepności i stan początkowy.
- Profile stalowe konstrukcyjne można wybierać ze zintegrowanej biblioteki 535 profili obejmujących jedenaście rodzin europejskich: IPE, HEA, HEB, HEM, UNP, UPE, UAP, LNP oraz profile zamknięte kwadratowe, prostokątne i okrągłe. Mogą być reprezentowane albo przez GeoDomain zintegrowane z rzeczywistym obszarem, łącznie z zakrzywionymi przejściami i zaokrągleniami, albo przez zespół elementów TSP.
- Element TSP opisuje prostą lub zakrzywioną linię środkową płyty oraz jej grubość. Jego udział uzyskuje się poprzez całkowanie linii, przy założeniu, że naprężenia są jednolite na całej grubości. Ta reprezentacja jest odpowiednia dla cienkich blach, profili ze stali konstrukcyjnej i wielokomórkowych profili skrzynkowych.
- Modele materiałowe są przypisane bezpośrednio do komponentów. Mogą korzystać z modeli normowych dostarczonych przez SectionPro lub z ogólnej zależności naprężenie–odkształcenie zdefiniowanej przez użytkownika dla rozważanych stanów granicznych.



Słup zespolony: beton, przekrój HEB i zbrojenie pasywne.

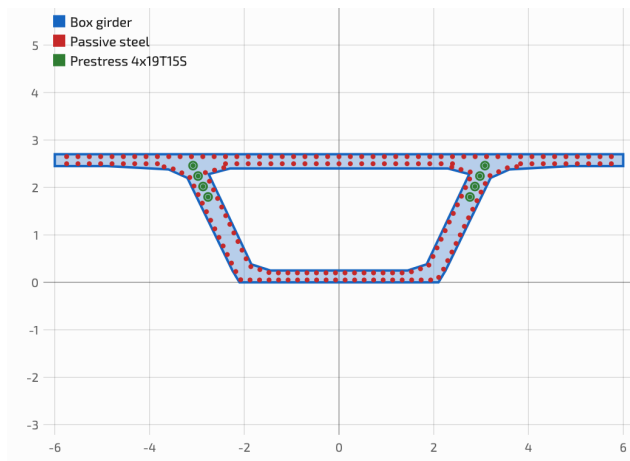


Stalowy dźwigar skrzynkowy: 267 elementów TSP i 51 komór Bredta.

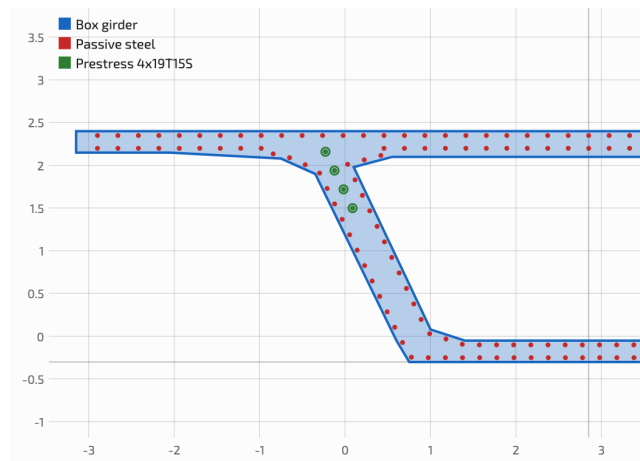
Rysunek 1: Przykłady przekrojów zaawansowanych wyświetlanych w SectionPro.

Przykład: dźwigar skrzynkowy mostu

Badany przekrój jest krytycznym przekrojem nad podporą jednokomórkowego dźwigara skrzynkowego. Ma 12,00 m szerokości i 2,70 m głębokości. Płyta górna, pochyłe środniki, skosy i płyta dolna tworzą jedną betonową domenę. Komórkę centralną definiuje się jako wewnętrzną pustkę.



(a) Widok ogólny przekroju.



(b) Szczegół lewego górnego klinu.

Rysunek 2: Model SectionPro: domena betonowa, zbrojenie pasywne i grupy sprężające.

Część	Tworzywo	Definicja na przykładzie
GeoDomain 1	Beton C45/55	Kontur skrzynki, jedna komórka wewnętrzna, pole brutto 6,759 m ²
Zbrojenie pasywne	B500B	186 prętów HA16 rozmieszczonych 50 mm od powierzchni betonu
Sprężenie	Y1860	Osiem ciągów 19T15S, po cztery wzdłuż każdego środnika, 2.850 mm ² na ciągnio i kanały o średnicy 100 mm

Przekrój zawiera 186 prętów zbrojeniowych i osiem ciągów sprężających. Cztery kanały wzdłuż każdego środnika są ułożone zgodnie z jego kierunkiem i sięgają do górnego skosu. Współrzędne są generowane przez skrypt, a następnie zapisywane w pliku przekroju zaawansowanego. Ten sam plik jest wykorzystywany we wszystkich przedstawionych dalej analizach.

Siły przekrojowe i sprężanie

Całkowity wektor sił przekrojowych rozkłada się na efekty obciążeń stałych G , obciążeń zmiennych Q i sprężenia P : $\mathbf{S} = \mathbf{S}_G + \mathbf{S}_Q + \mathbf{S}_P$.

Dla rozpatrywanego przekroju model konstrukcyjny MES opracowany w naszym oprogramowaniu LFEM daje następujące wektory sił przekrojowych $G + Q$ w MN i MN · m: $\mathbf{S}_{G+Q}^{\text{SGU}} = (0; -58,650; 0)$ i $\mathbf{S}_{G+Q}^{\text{SGN}} = (0; -92,650; 0)$.

W SectionPro sprężenie jest uwzględniane na dwóch poziomach. Jego działanie na konstrukcję, obejmujące efekt pierwotny i ewentualny efekt wtórny, musi zostać wprowadzone do przyłożonego wektora sił przekrojowych. Symetria poprzeczna przekroju i trasy ciągów powoduje tu wyzerowanie momentu względem y ; dlatego $\mathbf{S}_P = (N_P, M_{z,P}^{\text{pierwotny}} + M_{z,P}^{\text{wtórny}}, 0)$.

Efektywne naprężenie ścięgna określa stan początkowy związany z działaniem sprężającym. W obliczeniach wytrzymałości stan odkształcenia równowagowego zmienia następnie naprężenie ścięgna: wydłużenie powoduje dodatni przyrost naprężenia i zwiększa udział ścięgna, podczas gdy skracanie powoduje zmniejszenie naprężenia.

W przykładzie naprężenie efektywne po stratach wynosi 1116 MPa. Odpowiednie działanie wytwarza siłę osiową o wartości 25,445 MN. W sekcji podporowej ścięgna leżą powyżej środka ciężkości, co

daje pierwotny moment $+8,994 \text{ MN} \cdot \text{m}$. Dla tego profilu ciągnia model konstrukcyjny podaje moment wtórny o tym samym znaku, równy $+4,400 \text{ MN} \cdot \text{m}$. Moment sprężający wprowadzony w przekroju wynosi zatem $+13,394 \text{ MN} \cdot \text{m}$.

Końcowy wektor sił przekrojowych	$N \text{ [MN]}$	$M_z \text{ [MN} \cdot \text{m]}$	$M_y \text{ [MN} \cdot \text{m]}$
SGU	25,445	-45,256	0,000
SGN	25,445	-79,256	0,000

Wyniki dla pełnego modelu

Charakterystyka mechaniczna

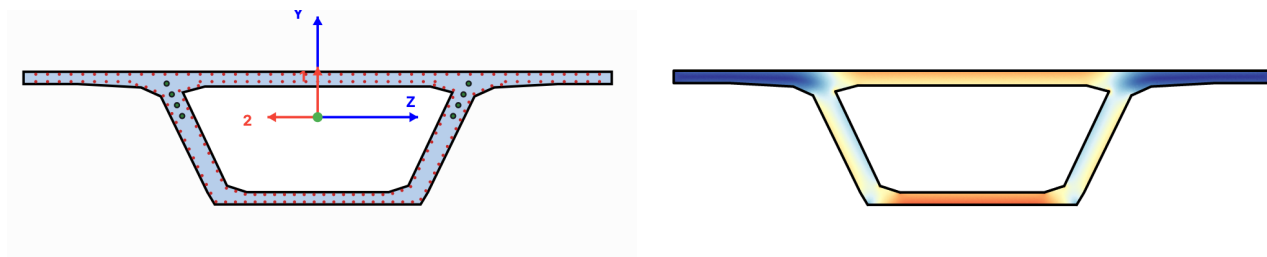
SectionPro oblicza właściwości przekroju brutto, netto i sprowadzonego. W tym przykładzie od przekroju netto odejmuje się tylko kanały kablowe; zbrojenie pasywne pozostaje uwzględnione. W przekroju sprowadzonym zarówno dla stali zbrojeniowej, jak i sprężającej przyjęto współczynnik równoważności $n = 5$.

Sekcja	$A \text{ [m}^2\text{]}$	$y_G \text{ [m]}$	$I_{zz} \text{ [m}^4\text{]}$	$I_{yy} \text{ [m}^4\text{]}$
Brutto	6,7590	1,7765	6,4096	55,5258
Netto	6,6962	1,7732	6,3979	54,9883
Sprowadzony	6,9598	1,7777	6,5809	57,1632

Poniżej podano właściwości skręcania i ścinania przekroju brutto.

$J \text{ [m}^4\text{]}$	$A_{sy} \text{ [m}^2\text{]}$	$A_{sz} \text{ [m}^2\text{]}$	$y_T \text{ [m]}$	$\Gamma \text{ [m}^6\text{]}$
13,6059	1,5031	4,5502	1,3508	6,5277

Pole pokazane poniżej odpowiada naprężeniom ścinającym wytwarzanym przez jednostkowy moment obrotowy.

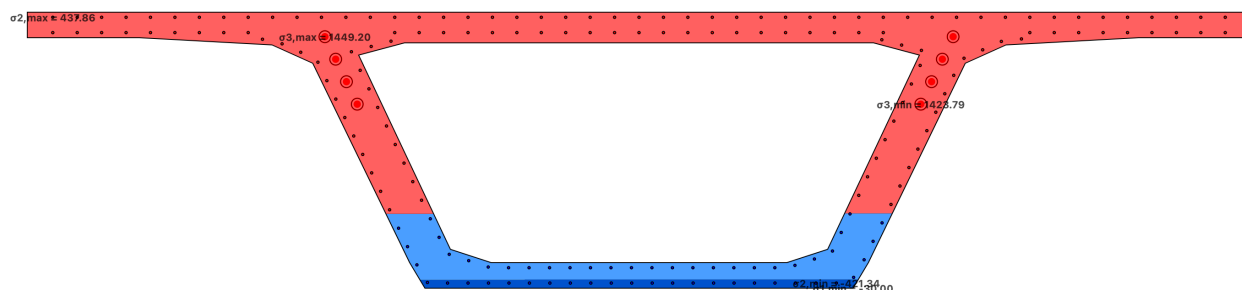


Rysunek 3: Ośie środkowe i główne (po lewej) oraz pole naprężeń stycznych przy skręcaniu jednostkowym (po prawej).

Równowaga w SGU i SGN

Solver wyznacza stan odkształcenia przekroju równoważący przyłożone siły przekrojowe. Następnie naprężenia są obliczane z odpowiednich modeli materiałowych betonu, zbrojenia pasywnego i cięgien. Przedstawione wyniki odpowiadają kombinacji charakterystycznej w SGU i kombinacji podstawowej w SGN.

W przypadku ścięgien końcowe naprężenie ocenia się na podstawie skumulowanego odkształcenia $\varepsilon_0 + \Delta\varepsilon_1 + \Delta\varepsilon_2$. Termin ε_0 oznacza odkształcenie związane z naprężeniem efektywnym wynoszącym 1116 MPa; $\Delta\varepsilon_1$ reprezentuje dowolną dekompresję betonu sąsiadującego z ciągnem; a $\Delta\varepsilon_2$ oznacza odkształcenie otrzymane z równowagi przekroju. W tym przykładzie włączony jest efekt dekompresji.



Rysunek 4: Pole naprężeń normalnych w SGN uzyskane z nieliniowej weryfikacji końcowego wektora sił przekrojowych.

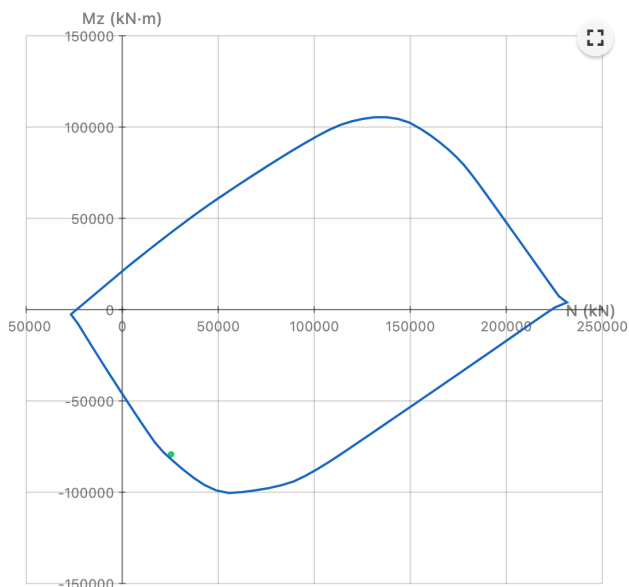
Wynik	Jed- nostka	Charakterystyczny SGU	Podstawowy SGN
Beton			
Minimalne odkształcenie, $\varepsilon_{b, \min}$	‰	−0,531	−2,262
Minimalne naprężenie, $\sigma_{b, \min}$	MPa	−19,264	−30,000
Zbrojenie pasywne			
Minimalne odkształcenie, $\varepsilon_{s, \min}$	‰	−0,512	−2,107
Maksymalne odkształcenie, $\varepsilon_{s, \max}$	‰	0,495	5,946
Minimalne naprężenie, $\sigma_{s, \min}$	MPa	−102,31	−421,34
Maksymalne naprężenie, $\sigma_{s, \max}$	MPa	99,09	437,86
Stal sprężająca			
Minimalne odkształcenie, $\varepsilon_{p, \min}$	‰	0,166	3,297
Minimalne naprężenie całkowite, $\sigma_{p, \min}$	MPa	1148,32	1423,79
Minimalny przyrost naprężenia, $\Delta\sigma_{p, \min}$	MPa	32,32	307,79
Maksymalne odkształcenie, $\varepsilon_{p, \max}$	‰	0,422	5,352
Maksymalne naprężenie całkowite, $\sigma_{p, \max}$	MPa	1198,23	1449,20
Maksymalny przyrost naprężenia, $\Delta\sigma_{p, \max}$	MPa	82,23	333,20
Rozwiązanie			
Iteracje		4	6
Residuum zbieżności		$1,0 \times 10^{-11}$	$4,7 \times 10^{-7}$
Konwergencja		Tak	Tak

W podstawowej kombinacji SGN beton płyty dolnej lokalnie osiąga plastyczne plateau ściskania, natomiast w płycie górnej i górnych częściach środków powstaje znaczna strefa rozciągana. Ciężna są silnie wykorzystane, a przyrost naprężenia mieści się w zakresie 307,8–333,2 MPa.

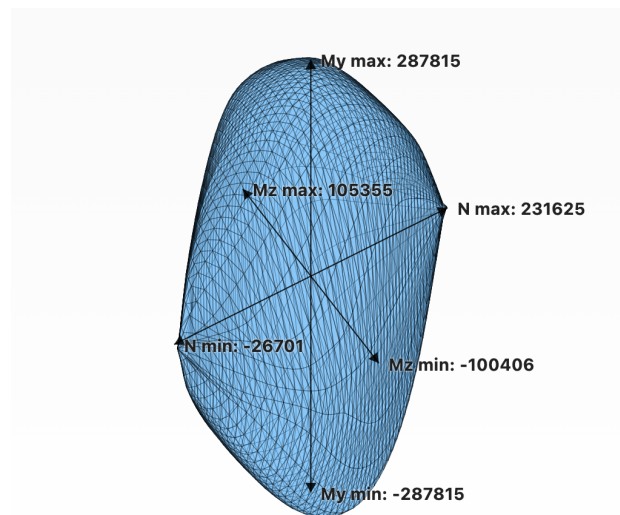
Dla charakterystycznej kombinacji SGU warunki naprężeniowe są spełnione: maksymalne naprężenie ściskające w betonie wynosi 19,264 MPa, maksymalne naprężenie rozciągające w zbrojeniu pasywnym 99,09 MPa, a maksymalne całkowite naprężenie w ciężnach 1198,23 MPa. Szerokość rysy $w_k = 0,174$ mm pozostaje niewielka, mimo że jest tu oceniana dla kombinacji charakterystycznej.

Domeny interakcji

Zaawansowana geometria i modele materiałowe są również wykorzystywane do obliczania obszarów nośności. Krzywa $N-M_z$ jest przekrojem tego obszaru dla $M_y = 0$. Powierzchnia $N-M_z-M_y$ rozszerza obliczenia na wszystkie kierunki zginania.



Rysunek 5: Krzywa interakcji N - M_z w SGN dla $M_y = 0$ z zaznaczonym końcowym wektorem sił przekrojowych.



Rysunek 6: Powierzchnia interakcji N - M_z - M_y w SGN.

Poniższa tabela przedstawia obwiednię powierzchni interakcji, określoną przez minimalne i maksymalne wartości każdego z jej trzech składników.

Część	Minimum	Maksymalny
N	-26,70 MN	231,62 MN
M_z	-100,41 MN · m	105,35 MN · m
M_y	-287,82 MN · m	287,82 MN · m

Dodatnie i ujemne nośności względem M_y pokrywają się zgodnie z poprzeczną symetrią przekroju. Różnica między dodatnią i ujemną nośnością względem M_z wynika z odmiennej geometrii i zbrojenia płyty górnej i dolnej. Końcowy wektor sił przekrojowych leży bardzo blisko granicy obszaru nośności. Moduł odległości od obszaru daje $FS = 0,983$: wartość nieco mniejszą od jedności, ale bardzo bliską granicy.

Wydajność

Poniższa tabela przedstawia czasy wykonania wywołań jądra SectionPro dla modelu skrzynkowego. Wartości te nie obejmują interfejsu graficznego ani wyświetlania wyników.

Analiza	Czas obliczeń
Charakterystyka mechaniczna	28,3 ms
Stan naprężeń i odkształceń	0,73 ms
Obliczanie otwarcia pęknięcia	2,38 ms
Krzywa interakcji N - M_z , 200 punktów	1,11 ms
Powierzchnia interakcji N - M_z - M_y , siatka 50×50	208 ms

Wyniki te ilustrują jedną z mocnych stron SectionPro: rozległa optymalizacja jądra zapewnia wyjątkowo krótkie czasy obliczeń, również dla analiz nieliniowych i budowy trójwymiarowych obszarów nośności. Sprawdzenia i kolejne warianty projektu dają więc wynik niemal natychmiast, co bezpośrednio przekłada się na płynną pracę użytkownika.

Wniosek

Przekroje zaawansowane łączą w jednym modelu kilka domen geometrycznych wraz z pustkami, warstwy zbrojenia pasywnego, grupy stali sprężającej, kształtowniki stalowe i cienkie blachy. Każdy komponent zachowuje własny model materiałowy w poszczególnych stanach granicznych.

Badany dźwigar skrzynkowy ilustruje tę reprezentację. Przekrój podporowy łączy domenę betonową z pustką wewnętrzną, zbrojenie rozmieszczone przy powierzchniach oraz cięgna sprężające prowadzone wzdłuż środków. Sprężenie wchodzi do przyłożonego wektora sił przekrojowych poprzez efekt pierwotny i wtórny. Udział cięgien w nośności jest oceniany na podstawie zmiany ich naprężenia, z uwzględnieniem początkowego sprężenia, ewentualnej dekompresji sąsiadującego betonu oraz równowagowego stanu odkształcenia przekroju.

Tryb zaawansowany pozwala zatem analizować praktycznie dowolny przekrój, niezależnie od złożoności geometrii i rodzaju materiałów. Ta ogólność pozostaje oczywiście ograniczona założeniami analizy przekrojowej, w szczególności zasadą płaskich przekrojów oraz zgodnością odkształceń połączonych komponentów. Dzięki zoptymalizowanemu jądry obliczeniowemu nawet tak szczegółowe modele zapewniają niemal natychmiastową odpowiedź.