Załącznik 2

AUTOREFERAT

dotyczący działalności
naukowo-badawczej, dydaktycznej
i organizacyjnej

dr inż. Dariusz CZEPIŻAK

Politechnika Wrocławska
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
Wrocław 2019

Spis treści

1. Dane personalne ... 3

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe ... 3

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych ... 3

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.) ... 3

4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego ... 3
4.2. Zestawienie jednotematycznych publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe ... 4
4.3. Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania ... 6
4.3.1. Wprowadzenie ... 6
4.3.2. Obciążenia imperfekcyjne elementów ze zmienną parabolicznie siłą osiową ... 8
4.3.3. Obciążenia imperfekcyjne od skręcenia kratownicy ... 13
4.3.4. Wpływ obciążeń od imperfekcji na siły w płatwiach i krzyżulcach stężenia ... 14
4.3.5. Weryfikacja numeryczna modeli analitycznych ... 21
4.3.6. Uproszczenie normowej procedury wyznaczania obciążenia imperfekcyjnego ... 25
4.3.7. Podsumowanie ... 26

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych ... 31

6. Dorobek dydaktyczny i popularyzatorski oraz informacja o współpracy międzynarodowej habilitanta ... 33

6.1. Osiągnięcia dydaktyczne ... 33
6.2. Współpraca naukowa z instytucjami i przemysłem ... 33
6.3. Inne formy aktywności ... 34

1. Dane personalne

Imię i Nazwisko: Dariusz Czepiżak

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe

1) Lipiec 2001. Uzyskanie tytułu zawodowego: magister inżynier, kierunek Budownictwo, specjalność inżynieria budowlana. Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego. Tytuł pracy magisterskiej: *Projekt przekrycia dachowego z blach fałdowych*. Promotor: prof. dr hab. inż. Antoni Biegus. Recenzent: dr hab. inż. Bronisław Gosowski, prof. nadzw. PWr.
2) Lipiec 2006. Uzyskanie stopnia naukowego: doktor nauk technicznych, dyscyplina budownictwo, specjalność konstrukcje metalowe. Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego. Tytuł rozprawy doktorskiej: *Nośność graniczna lokalnie wzmocnionych wieloprzęsłowych blach fałdowych*. Promotor: prof. dr hab. inż. Antoni Biegus. Recenzenci: prof. dr hab. inż. Marian Gwóźdź, prof. dr hab. inż. Kazimierz Rykaluk.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

Od 01.10.2006 do 30.09.2010 r.: Asystent
Od 01.10.2010 r.: Adiunkt
Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.)

4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego

Zastępcze obciążenia stalowych stężeń połaciowych poprzecznych od wstępnych imperfekcji geometrycznych dźwigarów dachowych

4.2. Zestawienie jednotematycznych publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe

Tablica 1. Wykaz jednotematycznych publikacji wchodzących w skład osiągnięcia naukowego opublikowanych po uzyskaniu stopnia doktora

Lp.	Opis publikacji	Udział własny %	Punktacja/Uwagi
T1.1	**Czepiżak D**.: *Uproszczona metoda obliczania poprzecznych stężeń dachowych*, Inżynieria i Budownictwo, 2013, nr 11, s. 598-600.	100	Punktacja MNiSW z 2013: 04; 2013-2016: 07.
T1.2	**Czepiżak D.**, Biegus A.: *Refined calculation of lateral bracing systems due to global geometrical imperfections*, Journal of Constructional Steel Research. 2016, vol. 119, s. 30-38, ISSN: 0143-974X. Zakres merytoryczny udziału: 1) Wspólna koncepcja publikacji, studia literaturowe, przygotowanie publikacji, opracowanie wniosków. 2) Indywidualna opracowanie modelu obliczeniowego, wykonanie obliczeń symboliczno-numerycznych, opracowanie wyników analiz.	65	Punktacja MNiSW z 2016: 35; 2013-2016: 35, **IF 2,028** **Baza Web of Science** **Baza Scopus**
T1.3	Biegus A., **Czepiżak D.**: *Uściślony model imperfekcyjnych obciążeń płatwi i stężeń*, Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury = Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture. 2016, t. 33, z. 63, nr 1, s. 307-314. Zakres merytoryczny udziału: 1) Wspólna koncepcja publikacji, wytypowanie przedstawionych zagadnień, przygotowanie publikacji, opracowanie wniosków. 2) Indywidualna koncepcja modelu obliczeniowego, opracowanie wyników.	60	Punktacja MNiSW z 2016: 09; 2013-2016: 09.
T1.4	Biegus A., **Czepiżak D.**: *Equivalent stabilizing force of the simply supported roof girders including the longitudinal variability of the compression force acting in the restrained chord*, Civil and Environmental Engineering Reports. 2017, vol. 25, nr 2, s. 43-57 Zakres merytoryczny udziału: 1) Wspólna koncepcja publikacji, określenie modeli do analiz, analiza rezultatów i opracowanie wniosków, redakcja publikacji. 2) Indywidualna opracowanie modelu obliczeniowego, analizy statyczne, opracowanie wyników analiz.	60	Punktacja MNiSW z 2013-2016: 09. **Baza Web of Science**
T1.5	Biegus A., **Czepiżak D.**: *Imperfection force of members under longitudinal action having a variable sign*, Ce/papers [Dokument elektroniczny]. 2017, vol. 1, nr 2/3, s. 3719-3728, Eurosteel, Copenhagen, Denmark, September 13-15, 2017. Zakres merytoryczny udziału: 1) Wspólna koncepcja publikacji, wytypowanie schematów do analiz, przygotowanie publikacji, opracowanie rezultatów i wniosków. 2) Indywidualne wykonanie modeli analitycznych i numerycznych, opracowanie wyników analiz.	60	Punktacja MNiSW z 2017: 05.

Lp.	Opis publikacji	Udział własny %	Punktacja/Uwagi
T1.6	Biegus A., **Czepiżak D.**: *Obciążenie imperfekcyjne elementów wytężonych znakozmienną wzdłużnie siłą osiową*, Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury = Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture. 2017, t. 34, z. 64, nr 3, s. 371-386. Zakres merytoryczny udziału: 1) Wspólna koncepcja publikacji, wytypowanie modeli do analiz, przygotowanie publikacji, analiza i synteza wyników. 2) Indywidualne wykonanie obliczeń symboliczno-numerycznych jak i numerycznych MES, opracowanie wyników analiz.	60	Punktacja MNiSW z 2013-2016: 09.
T1.7	Biegus A., **Czepiżak D.**: *Generalized model of imperfection forces for design of transverse roof bracings and purlins*, Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2018, vol. 18, nr 1, s. 267-279, ISSN: 1644-9665. Zakres merytoryczny udziału: 1) Wspólna koncepcja publikacji, określenie schematów do analiz, przygotowanie publikacji, synteza wyników, opracowanie wniosków. 2) Indywidualne wykonanie modeli analitycznych i obliczeń statycznych, opracowanie wyników analiz.	60	Punktacja MNiSW z 2013-2016: 30 **IF – 2,763 (2017)** **Baza Web of Science** **Baza Scopus**
T1.8	Biegus A., **Czepiżak D.**: *Analytical and numerical research of equivalent stabilizing force of stiffened truss chords*, W: 64 Scientific Conference of the Committee for Civil Engineering of the Polish Academy of Sciences and the Science Committee of the Polish Association of Civil Engineers (PZITB) (KRYNICA 2018) : Krynica Zdrój, Poland, September 16-20, 2018 / K. Wilde and M. Niedostatkiewicz (Eds.). [Les Ulis] : EDP Sciences, 2019. art. 09003, MATEC Web of Conferences, ISSN 2261-236X; vol. 262. Zakres merytoryczny udziału: 1) Wspólna koncepcja publikacji, wytypowanie modeli do analiz parametrycznych, przygotowanie publikacji, synteza rezultatów, opracowanie wniosków. 2) Indywidualne wykonanie obliczeń analitycznych jak i numerycznych MES przestrzennego modelu prętowego, opracowanie wyników analiz.	60	**Baza Web of Science**
T1.9	Biegus A., **Czepiżak D.**: *Equivalent stabilizing force of members parabolically compressed by longitudinally variable axial force*, W: 64 Scientific Conference of the Committee for Civil Engineering of the Polish Academy of Sciences and the Science Committee of the Polish Association of Civil Engineers (PZITB) (KRYNICA 2018) : Krynica Zdrój, Poland, September 16-20, 2018 / K. Wilde and M. Niedostatkiewicz (Eds.). [Les Ulis] : EDP Sciences, 2019. art. 09004, MATEC Web of Conferences, ISSN 2261-236X; vol. 262. Zakres merytoryczny udziału: 1) Wspólna koncepcja publikacji, wytypowanie schematów do analiz parametrycznych, przygotowanie publikacji, synteza wyników, opracowanie wniosków. 2) Indywidualne wykonanie analiz obliczeniowych, opracowanie wyników analiz.	60	**Baza Web of Science**

Lp.	Opis publikacji	Udział własny %	Punktacja/Uwagi
	Suma punktów		104
	Suma Impact Factor		4,791

Uwaga: Zestawienie opracowano na podstawie danych przekazanych przez Bibliotekę Główną Politechniki Wrocławskiej.

Oświadczam, iż żadna z przedstawionych, w osiągnięciu naukowym, publikacji nie była wykorzystana wcześniej w postępowaniu habilitacyjnym lub doktorskim.

4.3. Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

4.3.1. Wprowadzenie

Płaskie dźwigary dachowe kratowe lub pełnościenne wymagają zazwyczaj usztywnienia w płaszczyźnie połaci dachu. W tym celu stosuje się stężenia połaciowe poprzeczne, które są istotnym elementem konstrukcyjnym budowli. Zasady stosowania stężeń zostały ustalone na podstawie długoletniego doświadczenia. Dopiero jednak w ostatnich dwóch dekadach XX w. opracowano teoretyczne uzasadnienia obliczania obciążeń stężeń. Obciążenia stężeń wyznacza się stosując analityczny model wstępnie wygiętego usztywnionego elementu (model „imperfekt"): [B6, B8, B11, B12, B16, B17, B22, B24, B26, B9, B1, B18, B2, B3, B4, B5, B13]. Model „imperfekt" obliczania stężeń jest również rekomendowany w EN 1993-1-1 [B7]. Przyjęto w nim następujące **ZAŁOŻENIA**:

1) **Założenie Z1** - Stężany pas dźwigara oraz stężenie traktuje się jak wyizolowane z konstrukcji odpowiednio pręt i kratownicę. Są one połączone płatwiami (rys. 1a),
2) **Założenie Z2 -** Wstępne wygięcie (imperfekcja) stężanego pasa dźwigara w płaszczyźnie połaci dachu ma kształt paraboli o strzałce e_0 (rys. 1a),
3) **Założenie Z3** - Stężany element jest wytężony stałą na długości siłą ściskającą (rys. 1b).

W tym modelu oddziaływania od losowych, łukowych wygięć elementów o strzałce e_0, zastępuje się w obliczeniach równoważnymi obciążeniami imperfekcyjnymi q_{d1} i R_{d1} (rys. 1c) wyznaczanymi ze wzorów

$$q_{d1} = \sum_{i=1}^{m} N_{Ed,i} 8 \frac{e_0 + \delta_q}{L^2}, \tag{1}$$

$$R_{d1} = -\frac{1}{2} q_{d1} L, \tag{2}$$

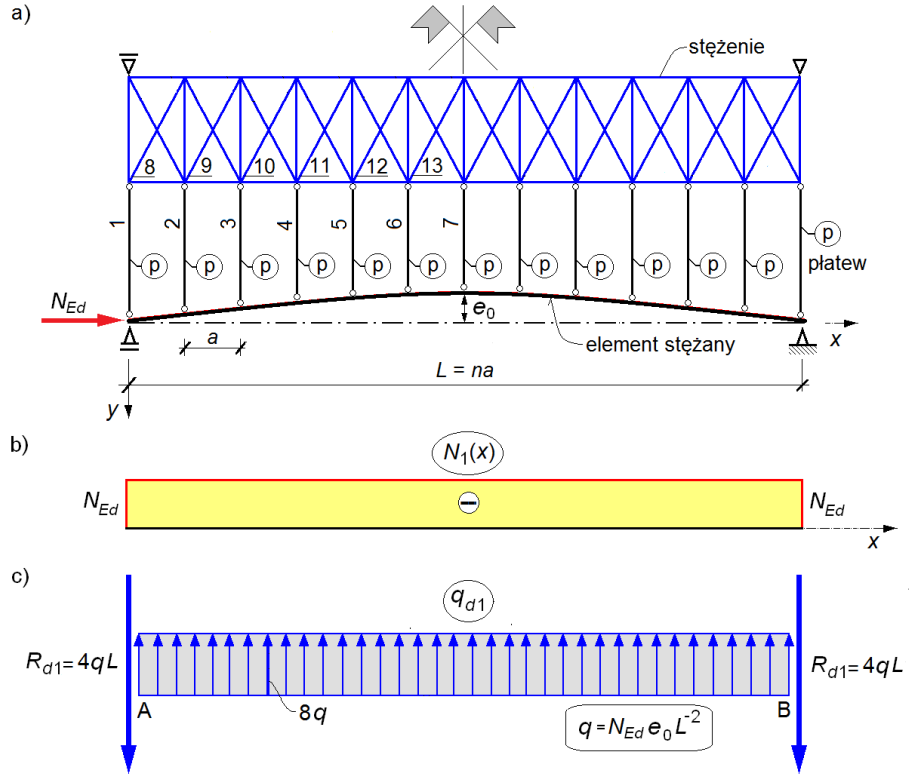
gdzie:

$N_{Ed,i}$ – siła osiowa w i-tym stężanym elemencie,

e_0 – strzałka wstępnego wygięcia elementów stężanych,

δ_q – ugięcie stężenia od odziaływania q_d i wszystkich obciążeń zewnętrznych, uzyskane z analizy pierwszego rzędu,

L – rozpiętość stężanego elementu.



Rys. 1. Schemat: a) stężenia i elementu podpieranego, b) siły osiowej stałej na długości ściskanego elementu, c) obciążenia zastępczego elementu stężanego z imperfekcjami.

Model zaproponowany w EN 1993-1-1 [B7] nie uwzględnia szeregu istotnych zjawisk jakie pojawiają się w przypadku stężanych pasów dźwigarów dachowych. Na przykład Pałkowski i Piątkowski w [B19] zwrócili uwagę, że pasy dźwigarów są wytężone wzdłużnie zmienną na długości siłą osiową o rozkładzie zbliżonym do parabolicznego i tym samym nie jest spełnione założenia Z3 normowego modelu obliczeniowego. Ponadto wykazali, że płaszczyzna główna dźwigara kratowego jest skręcona w wyniku wygięcia stężanego pasa górnego i prostoliniowego pasa dolnego co powoduje powstanie w tężniku dodatkowej siły poziomej. Oprócz tego można wykazać, że rozciągane pasy dźwigarów również wywierają siły na stężenia. Co więcej pas stężony i niestężony dźwigara są połączone wykratowaniem i tworzą układ przestrzenny (tym samym nie jest spełnione założenie Z1 modelu obliczeniowego), w którym istotny jest także wpływ sztywności elementów wykratowania dźwigara i ich połączeń z pasami. W dodatku EN 1993-1-1 [B7] wprowadza wzór (1) na obliczania obcią-

żenie zastępczego q_d, który wymaga rozwiązania w sposób iteracyjny, co jest ewidentną niedogodnością.

Celem prac przedstawionych jako osiągnięcie naukowe jest rozszerzenie wiedzy dotyczącej obliczania połaciowych stężeń poprzecznych, opracowanie uogólniających modeli obliczeniowych uwzględniających rzeczywiste wytężenie i zachowanie stężeń. W ramach tego celu przy zachowaniu założeń Z1 i Z2 zrealizowano następujące cele cząstkowe:

1) wyznaczono obciążenia od imperfekcji w elementach ze zmienną parabolicznie siłą osiową na ich długości,
2) wyznaczono obciążenia stężeń pochodzące od skręcenia kratownicy,
3) zbadano wpływ obciążeń z pkt. 1, 2 na siły w krzyżulcach i słupkach stężeń; wyniki porównano z uzyskanymi dla obciążeń wg wzoru (1) i (2),
4) modele analityczne zweryfikowano metodami numerycznymi,
5) opracowano równoważną do (1) formułę, która wyeliminowała konieczność iteracyjnych obliczeń obciążenia imperfekcyjnego q_d.
6) podano wnioski do wykorzystania w praktyce inżynierskiej.

4.3.2. Obciążenia imperfekcyjne elementów ze zmienną parabolicznie siłą osiową

W przypadku analizy obciążeń imperfekcyjnych stężanych pasów górnych dźwigarów dachowych wg EN 1993-1-1 [B7], założenie Z3, dotyczące stałej na długości siły w psie $N_1(x) = \text{const}$ nie jest poprawne. Nie odpowiada ono bowiem rzeczywistemu, wzdłużnie zmiennemu rozkładowi siły podłużnej w stężanym elemencie. Zazwyczaj siła osiowa na długości stężanego pasa dźwigara (rys. 2a, b, c, d) zmienia się parabolicznie lub „skokowo"-parabolicznie (jak na rys. 2e, f), a także może być znakozmienna (występuje ściskanie i rozciąganie). Przy czym wzdłużnie „skokowo"-parabolicznie zmienny rozkład siły osiowej w stężanym pasie można aproksymować rozkładem ciągłym.

W pracy [T1.7] zaproponowano w formie uogólnionej rozwiązanie analityczne wyznaczania obciążenia od imperfekcji. W rozwiązaniu tym przyjęto założenia Z1 i Z2 jak w EN 1993-1-1 [B7], ale uwzględniono zmienną siłę osiową na długości pręta. Wzdłużną zmienność siły osiowej $N(s)$ stężanego elementu zdefiniowano parametryczną funkcją paraboliczną, którą opisuje zależność:

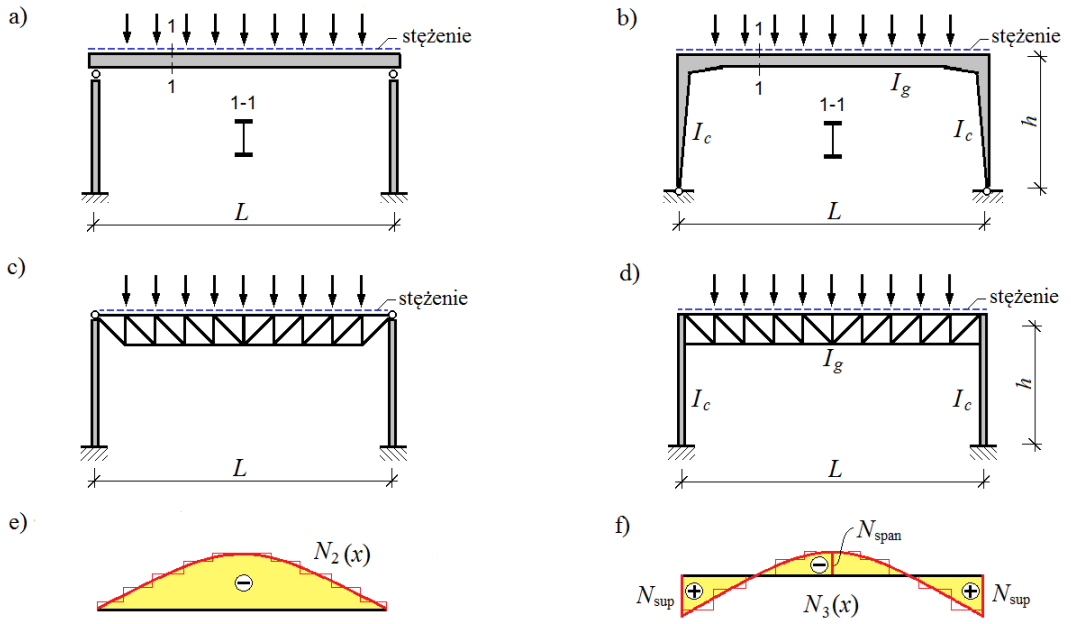
$$N(s) = N_{Ed,\max}\left\{\alpha\left(2s^2 - 3s + 1\right) - s\left[\gamma + 4\beta\left(s-1\right) - 2\gamma s\right]\right\}, \tag{3}$$

gdzie:

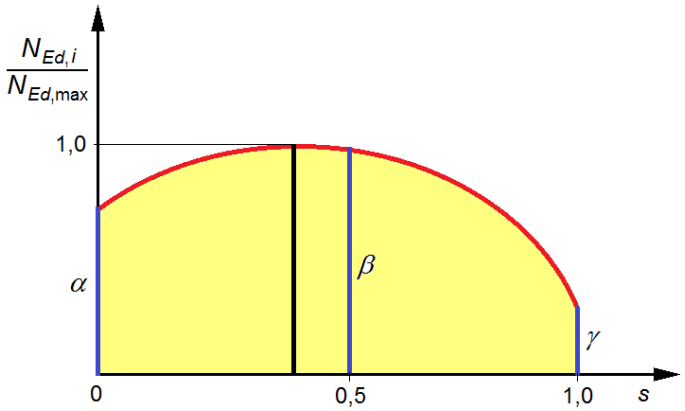
$N_{Ed,max}$ – maksymalna siła osiowa w elemencie stężanym,

α, β, γ – bezwymiarowe współczynniki rozkładu siły osiowej na pręcie (rys. 3) odpowiednio na lewym końcu, w środku i na prawym końcu; przyjmują one wartości w zakresie $\langle -1,1 \rangle$; („+" - ściskanie, „-" – rozciąganie),

$s = x/L$ – współrzędna względna w zakresie $\langle 0,1 \rangle$.



Rys. 2. Schematy: a), c) rygli dachowych połączonych przegubowo ze słupami, b), d) rygli dachowych połączonych sztywno ze słupami, e), f) rozkład siły osiowej w stężanym pasie górnym rygla dachowego



Rys. 3. Schemat oznaczenia rozkładu siły osiowej na długości elementu stężanego

Ten ogólny zapis funkcji rozkładu siły osiowej, umożliwia uwzględnienie szerokiego spektrum przypadków występujących w praktyce inżynierskiej. Od elementów ściskanych siłą stałą na długości, poprzez cały szereg elementów odpowiadających pasom górnym dźwigarów obciążonych w sposób równomierny, do elementów rozciąganych siłą stałą na długości.

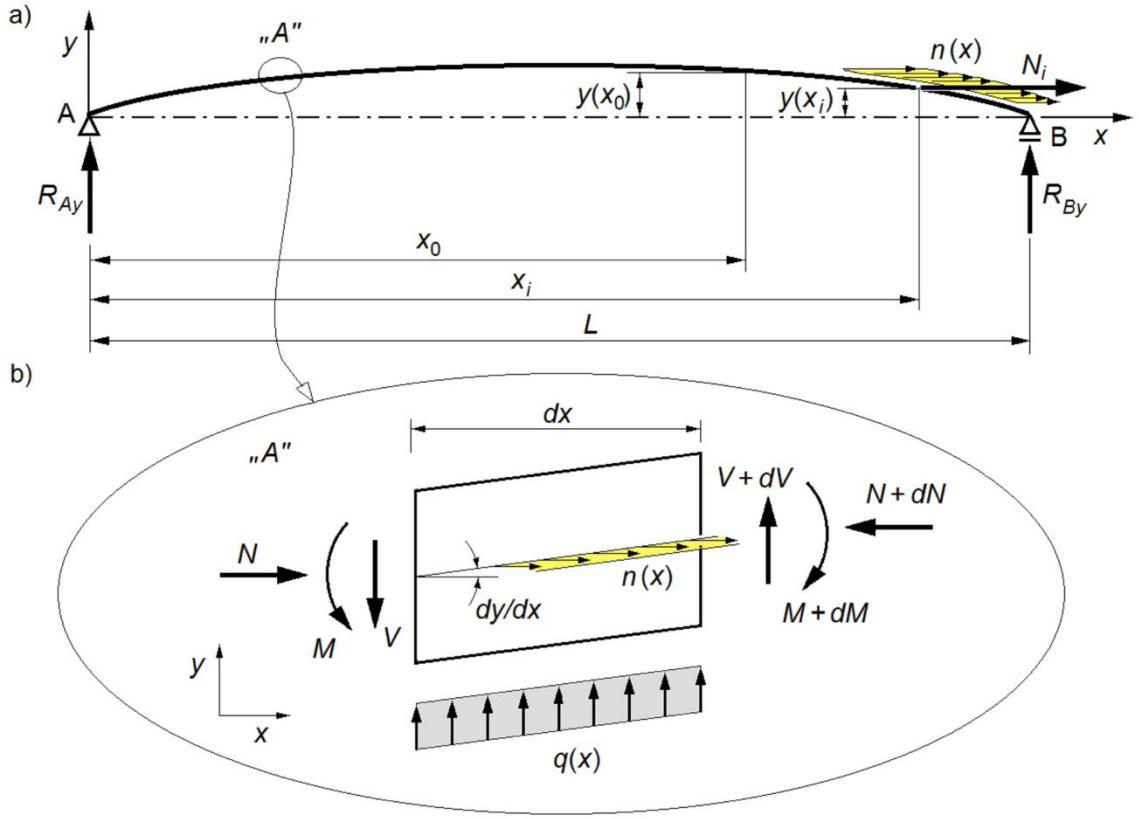
W proponowanym modelu obliczeniowym uwzględniono imperfekcję wstępnego wygięcia pręta zgodną z założeniami EN 1993-1-1 [B7] w postaci paraboli o strzałce e_0 opisanej równaniem:

$$y(s) = 4e_0 s(1-s), \tag{4}$$

gdzie:

e_0 – strzałka wstępnego wygięcia elementów stężanych, $e_0 = L/500$.

Rozwiązanie zagadnienia uzyskano przez porównanie momentów zginających w elemencie wstępnie wygiętym obciążonym siłami podłużnymi z belką prostą obciążoną poprzecznie zmiennym obciążeniem na jej długości (rys. 4). W obu przypadkach rozkłady momentów zginających powinny być identyczne.



Rys. 4. Schemat statyczny wstępnie wygiętego elementu ściskanego osiowo

W ogólnym przypadku, na podstawie [B25], moment zginający w elemencie ściskanym ze wstępnym wygięciem jak na rys. 4 w przekroju oddalonym o x_0 od lewej podpory może być opisany równaniem:

$$M(x_0) = -\int_{x_0}^{L} n(x)[y(x_0) - y(x)]dx - \sum_{i}^{n} N_i[y(x_0) - y(x_i)] - R_{By}(L - x_0), \tag{5}$$

gdzie:

$$R_{By} = \frac{\int_0^L n(x)y(x)dx + \sum_{i=1}^{n} N_i y(x_i)}{L}, \tag{6}$$

w którym:

$n(x)$ – obciążenie podłużne rozłożone na części lub całości elementu,

N_i – skupione obciążenia podłużne elementu przyłożone w przekroju x_i

i – numer skupionej siły osiowej. W równaniu (5) indeks i oznacza sumowanie sił skupionych przyłożonych do elementu w miejscach $x_i \geq x_0$.

Po uwzględnieniu, w równaniu (5), parabolicznego rozkładu siły osiowej w pręcie wg (3) (rys. 3) oraz kształtu imperfekcji wg (4) otrzymano przy użyciu oprogramowania Mathematica 11 [B15] zależność opisującą momenty zginające w postaci:

$$M(s)=\frac{2}{3}e_0 N_{Ed,\max} s(1-s)\left[\gamma+\alpha\left(6s^2-10s+5\right)+6s^2(\gamma-2\beta)+2s(6\beta-\gamma)\right], \tag{7}$$

Poprzez różniczkowanie funkcji momentu zginającego otrzymano funkcje sił poprzecznych $V(s)$ i równoważnych poprzecznych obciążeń od imperfekcji $q(s)$ na długości elementu:

$$V(s)=\frac{1}{L}\frac{dM(s)}{ds}=$$

$$=\frac{2}{3}\frac{e_0 N_{Ed,\max}}{L}\left[5\alpha+\gamma-24s^3(\alpha-2\beta+\gamma)+24s^2(2\alpha-3\beta+\gamma)-6s(5\alpha-4\beta+\gamma)\right], \tag{8}$$

$$q(s)=-\frac{1}{L}\frac{dV(s)}{ds}=$$

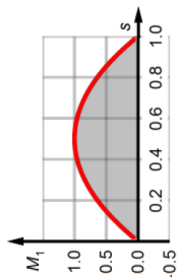
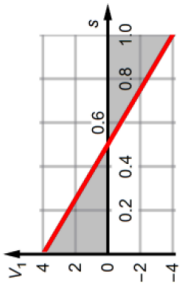
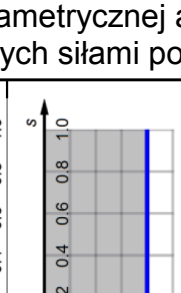
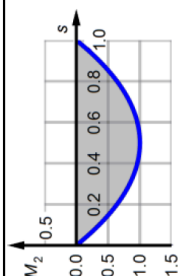
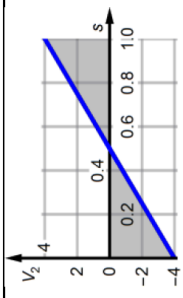
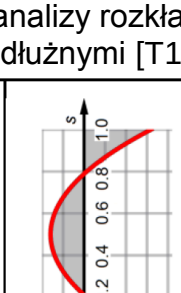
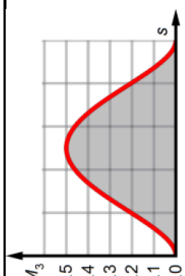
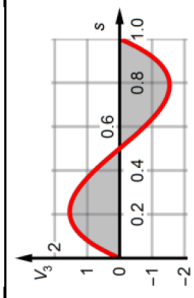
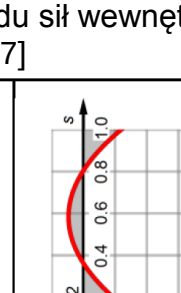
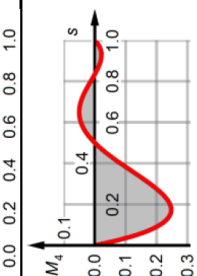
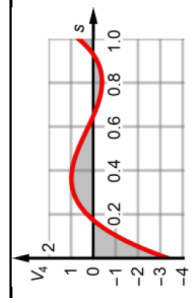
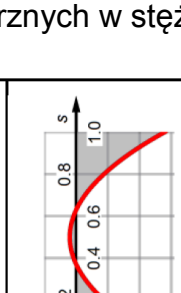
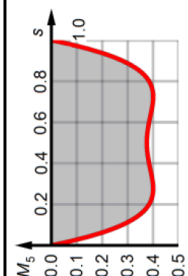
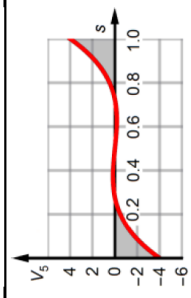
$$=4\frac{e_0 N_{Ed,\max}}{L^2}\left[\alpha\left(12s^2-16s+5\right)-4\beta\left(6s^2-6s+1\right)+\gamma\left(12s^2-8s+1\right)\right]. \tag{9}$$

Są to rozwiązania ogólne, które pozwalają na wyznaczenie momentu zginającego $M(s)$, siły poprzecznej $V(s)$ i obciążenia od imperfekcji $q(s)$ dla dowolnej kombinacji parametrów α, β, γ w dziedzinie $\langle -1,1\rangle$. Przykłady zastosowania wzorów (3), (7), (8), (9) podano w tab. 2.

Schemat 1 (tab.1) to element ściskany stałą na długości siłą osiową np. słup osiowo ściskany. Schemat 2 (tab. 2) odpowiada elementowi obciążonemu stałą na długości siłą rozciągającą. Schemat 3 (tab. 2) opisuje rozkład sił wewnętrznych w pasie ściskanym dźwigara swobodnie podpartego obciążonego równomiernie rozłożonym obciążeniem poprzecznym. Schemat 4 (tab. 2) opisuje rozkład siły osiowej w pasie górnym dźwigara o schemacie belki dwuprzęsłowej obciążonej równomiernie rozłożonym obciążeniem poprzecznym. Natomiast schemat 5 (tab. 2) opisuje rozkład siły osiowej w pasie górnym dźwigara wieloprzęsłowego.

Przy czym przez równoważne obciążenie imperfekcyjne należy rozumieć obciążenie q o rozkładzie z kol. 5 tab. 2 oraz przyłożone na końcach elementu siły skupione $R_{Ay}(0) = -V(0)$, $R_{By}(L) = V(L)$ wg kol. 4 (rys. 1c). – „+” oznacza, że reakcja jest zgodna z kierunkiem osi y układu współrzędnych (rys. 4).

Tablica 2. Wyniki parametrycznej analizy rozkładu sił wewnętrznych w stężanych elementach obciążonych siłami podłużnymi [T1.7]

Schemat	Siła osiowa N_i $[N_{Ed,\max}]$	Moment zginający M_i $[N_{Ed,\max}\, e_0]$	Siła poprzeczna V_i $[N_{Ed,\max}\, e_0/L]$	Obciążenie q_i $[N_{Ed,\max}\, e_0/L^2]$
1	2	3	4	5
Schemat 1 $\alpha = 1, \beta = 1, \gamma = 1$				
Schemat 2 $\alpha = -1, \beta = -1, \gamma = -1$				
Schemat 3 $\alpha = 0, \beta = 1, \gamma = 0$				
Schemat 4 $\alpha = -1, \beta = 0.5, \gamma = 0$				
Schemat 5 $\alpha = -1, \beta = 0.25, \gamma = -1$				

Oznaczenia:
Siła osiowa N_i: „+" – ściskanie, „-" – rozciąganie.
Moment zginający M_i: „+" – rozciągane włókna górne, „-" – ściskane włókna górne (rys. 4).
Obciążenie imperfekcyjne q_i: „+" – siła skierowana zgodnie ze zwrotem osi y (rys. 4)

Zaproponowany model obliczania obciążenia od imperfekcji [T1.7] daje identyczne wyniki z modelem obliczeniowym opisanym w [B19] dotyczącym obliczania sił w równomiernie rozmieszczonych podporach ściskanego pasa górnego swobodnie podpartego i równomiernie obciążonego dźwigara kratowego. Przy czym model przedstawiony w [T1.7] jest bardziej ogólny od modelu opisanego w [B19] i w łatwy sposób może być zastosowany do pasów dźwigarów dachowych obciążonych równomiernie i dowolnie zamocowanych na końcach (rys. 2 – zamocowanie przegubowe, sztywne, podatne).

Ponadto wnioski wynikające z analiz wg modelu obliczania obciążenia od imperfekcji opisanego w [T1.7] zostały potwierdzone w badaniach doświadczalnych wykonanych przez M. Piątkowskiego z Politechniki Koszalińskiej [B20].

4.3.3. Obciążenia imperfekcyjne od skręcenia kratownicy

W obliczaniach wg EN 1993-1-1 [B7] analizuje się stężane pasy górne jako wstępnie wygięte pręty, które są „wyizolowane" z kratownicy (niepołączone wykratowaniem z pasami dolnymi). Taki model obliczeniowy nie odzwierciedla zachowania się i wytężenia rzeczywistej kratownicy, tj. skręcenia jej płaszczyzny głównej o kąt ϕ_0, w wyniku wygięcia pasa górnego o strzałce e_0 (rys. 5) [B19, T1.6, T1.2, T1.3, T1.7, T1.8].

Ściskany pas górny kratownicy jest krzywoliniowy, rozciągany pas dolny zaś jest prostoliniowy (rys. 5). W wyniku połączenia obu pasów wykratowaniem występuje skręcenie płaszczyzny głównej kratownicy. Stąd oprócz imperfekcji wygięcia pasa o strzałce e_0, występuje imperfekcja skręcenia o kąt $\phi_0(x)$ płaszczyzny głównej kratownicy (rys. 5a). W efekcie działania pionowych obciążeń P_{Ed} (przyłożonych w węzłach górnych) na skręconą kratownicę powstają poziome siły imperfekcyjne $H_i(x)$. Przekazują się one na płatwie oraz stężenie (rys. 5b), powodując ich dodatkowe wytężenie. Przyjmując schemat wytężenia ustroju jak na rys. 5c, imperfekcyjne poziome oddziaływania $H_i(s_i)$ od skręcenia kratownicy w poszczególnych jej węzłach i wyznacza się ze wzoru:

$$H_i(s_i) = y(s_i)\frac{P_{Ed}}{h_i} = 4e_0 s_i(1-s_i)\frac{P_{Ed}}{h_i}, \tag{10}$$

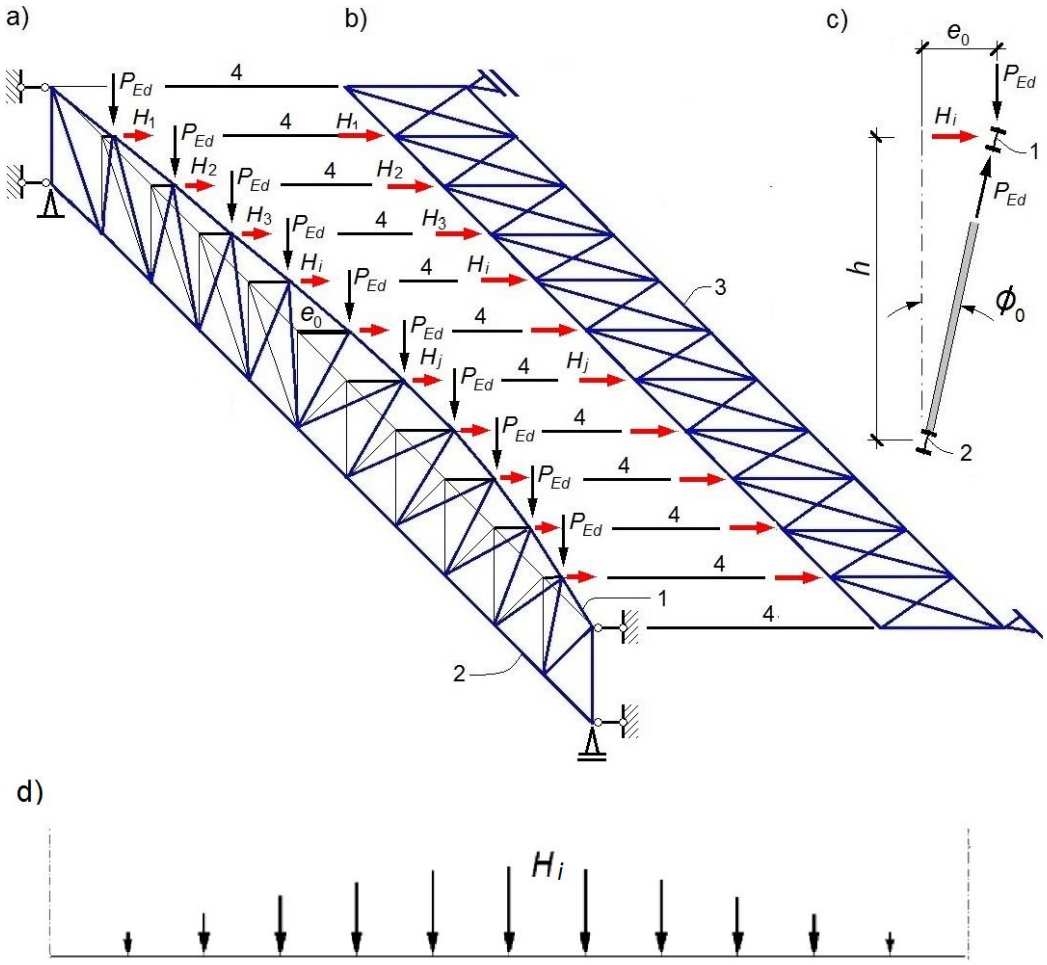
gdzie:

$y(s_i)$ – funkcja parabolicznej imperfekcji wstępnej o strzałce e_0 wg (4),

h_i – wysokość konstrukcyjna dźwigara w węźle i.

Rozkład imperfekcyjnych sił od skręcenia kratownicy $H_i(s_i)$ zmienia się na jej długości. W analizowanym przypadku jest on paraboliczny (rys. 5d), zgodny z przyjętym wygięciem osi stężanego elementu $y(s)$. Największe oddziaływania $H_i(s_i)$ są w środku rozpiętości kratownicy, gdy $y(0{,}5) = e_0$.

Model obliczania sił wewnętrznych od imperfekcji skręcenia kratownicy został zweryfikowany w [T1.8] za pomocą obliczeń numerycznych w programach RSA 2016 [B21] i Sofistik 2016 [B23]. Wykonane analizy numeryczne [T1.8] wykazały, iż maksymalne siły w płatwiach od skręcenia kratownicy są zbliżone do sił od obciążeń imperfekcyjnych pochodzących od wygięcia pasa stężanego.

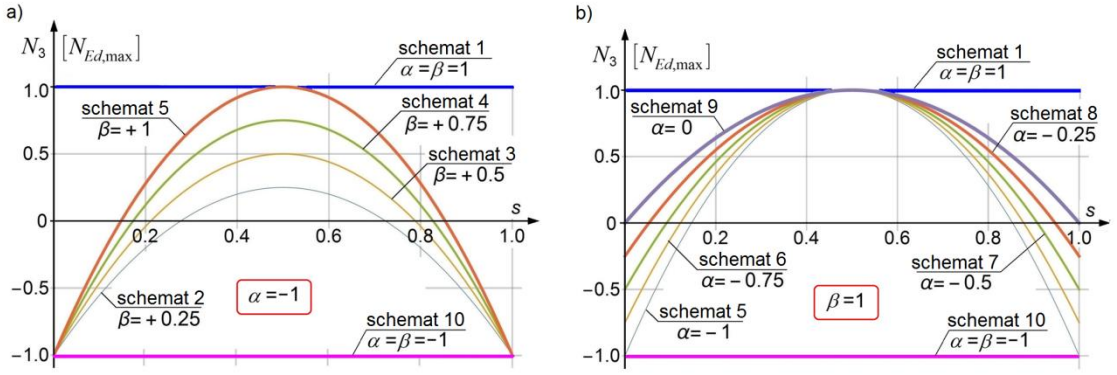


Rys. 5. Schemat: a) skręcenia płaszczyzny głównej kratownicy, b) obciążenia stężenia, c) wygięcia pasa górnego; 1 – pas górny kratownicy, 2 – pas dolny kratownicy, 3 – stężenie, 4 – płatew.

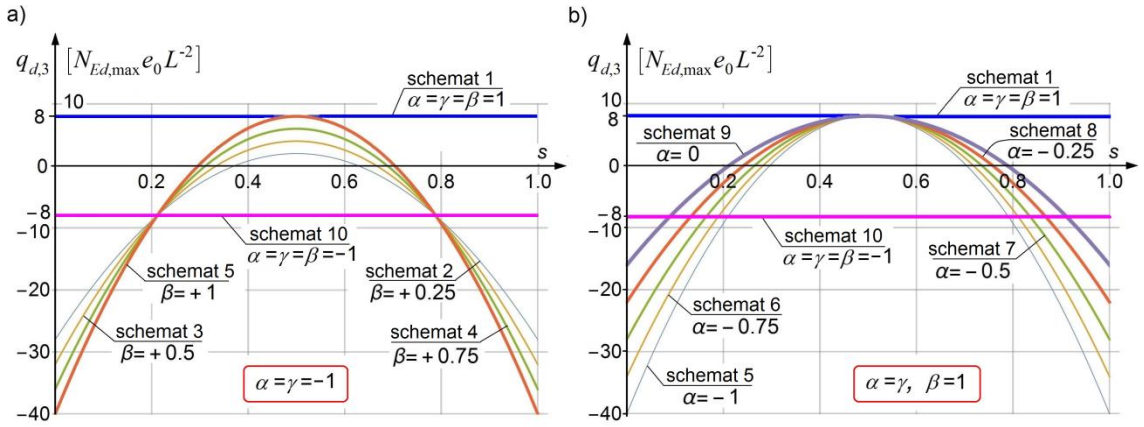
4.3.4. Wpływ obciążeń od imperfekcji na siły w płatwiach i krzyżulcach stężenia

Opisane w pkt. 4.3.2 i 4.3.3 modele oceny zastępczych obciążeń od imperfekcji pozwoliły wykonać szeroką analizę parametryczną sił w płatwiach i krzyżulcach stężenia dla zróżnicowanych rozkładów sił osiowych w elemencie stężanym oraz skręcenia kratownicy. Obliczenia statyczne wykonano w programach RSA 2016 [B21] i SOFISTIK 2016 [B23]. Otrzymane wyniki porównano z siłami w płatwiach i krzyżulcach wyznaczonymi wg modelu EN 1993-1-1 [B7]. Wyniki tych analiz przedstawiono w pracach [T1.4÷T1.9].

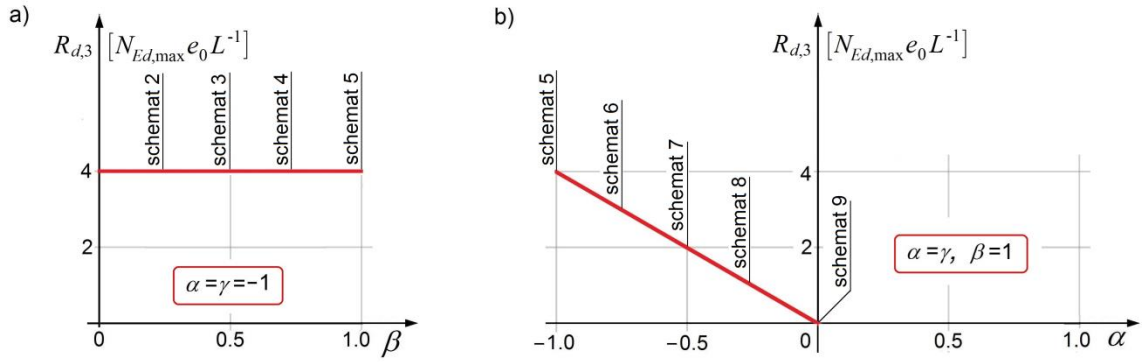
W przypadku dźwigarów dachowych pokazanych na rys. 2 rozkład siły osiowej w ich stężanych pasach górnych jest zmienny na długości i może zmieniać znak ze ściskania na rozciąganie w narożach dźwigarów zamocowanych w słupach. Dla symetrycznych rozkładów siły osiowej w elemencie stężanym, jak na rys. 6 ($\alpha = \gamma$, rys. 3) wyznaczono obciążenia od imperfekcji (rys. 7 i 8). Następnie obciążono nimi pręt stabilizowany tężnikiem (rys. 9). Dla tak określonych schematów statycznych wyliczono wartości sił w płatwiach i krzyżulcach stężenia i podano je w tab. 3.



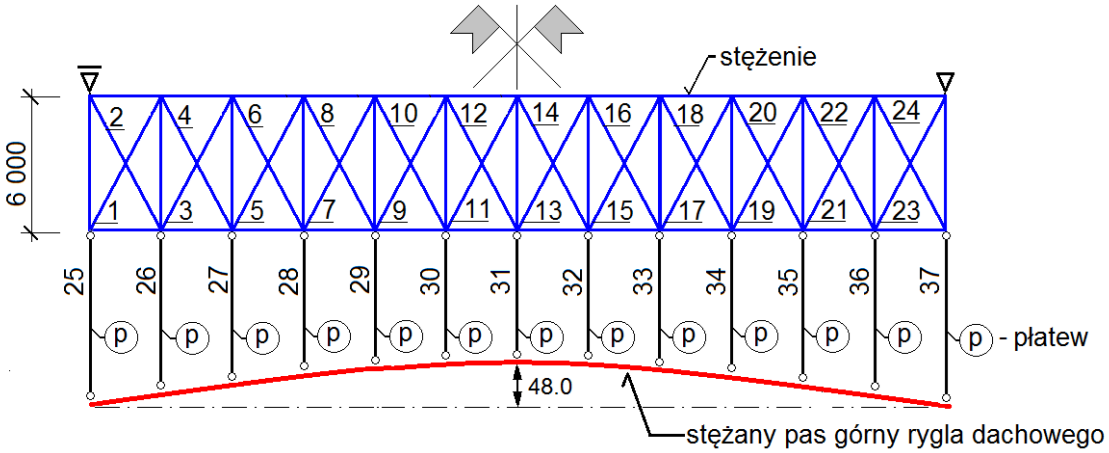
Rys. 6. Rozkład siły podłużnej $N_3(s)$ w stężanym elemencie w funkcji parametrów α, β



Rys. 7. Rozkłady obciążenia imperfekcyjnego $q_{d3}(s)$ stężanych elementów w funkcji parametrów α, β



Rys. 8. Reakcje podporowe R_{d3} stężanych elementów w funkcji parametrów α, β



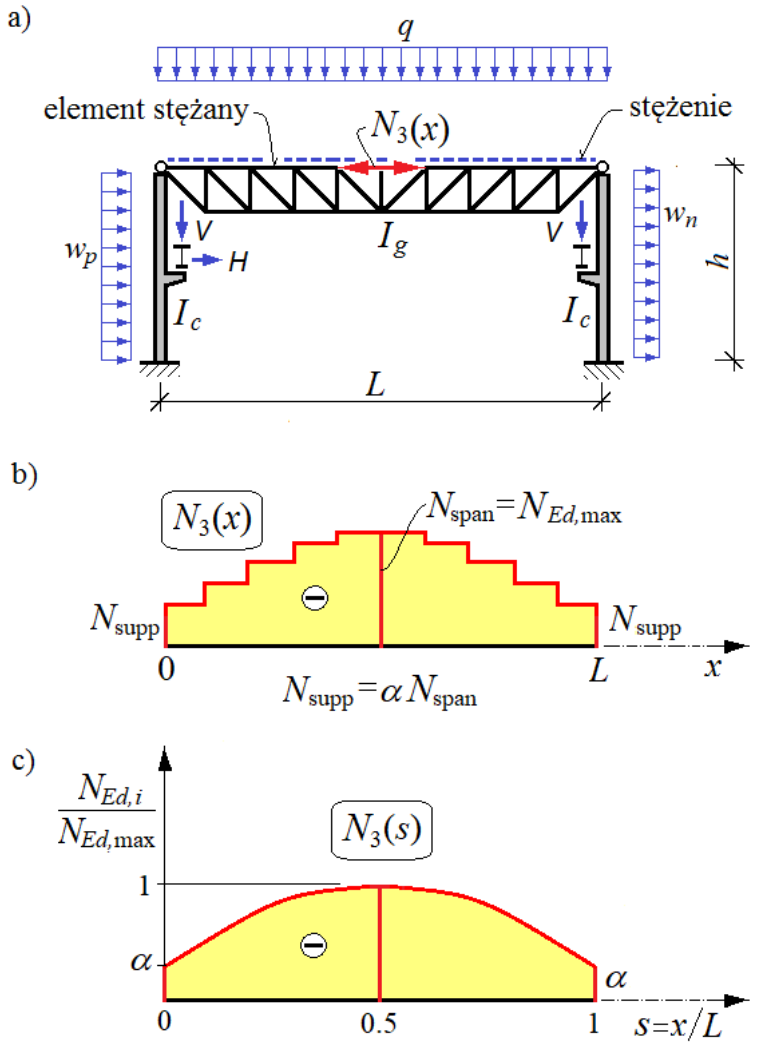
Rys. 9. Schemat stężenia dachowego

Tablica 3. Siły osiowe w krzyżulcach stężenia oraz płatwiach przy różnych schematach obciążenia imperfekcyjnego [kN] [T1.6]

Nr schematu	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
α	1	-1	-1	-1	-1	-0,75	-0,50	-0,25	0	-1
β	1	0,25	0,50	0,75	1	1	1	1	1	-1
Nr pręta	**Siły osiowe w krzyżulcach stężenia i płatwiach przy różnych schematach obciążenia imperfekcyjnego**									
Siły osiowe w krzyżulcach stężenia $S_{d,i}$ [kN]										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	-1,265	0	0	0	0	0	0	0	-0,202	0
2	0	-1,012	-0,962	-0,911	-0,861	-0,595	-0,330	-0,064	0	-1,265
3	-1,035	0	0	0	0	-0,016	-0,162	-0,307	-0,453	0
4	0	-0,469	-0,356	-0,243	-0,129	0	0	0	0	1,035
5	-0,805	0	0	-0,124	-0,257	-0,326	-0,394	-0,463	-0,531	0
6	0	-0,141	-0,008	0	0	0	0	0	0	0,805
7	-0,575	-0,019	-0,138	-0,257	-0,375	-0,400	-0,425	-0,450	-0,475	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.575
9	-0,345	-0,059	-0,140	-0,221	-0,302	-0,307	-0,313	-0,318	-0,323	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.345
11	-0,115	-0,028	-0,056	-0,085	-0,113	-0,114	-0,114	-0,114	-0,114	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,115
Siły osiowe w płatwiach $F_{d,i}$ [kN]										
25	-1,200	0,960	0,913	0,865	0,817	0,565	0,313	0,060	-0,192	1,200
26	0,218	-0,516	-0,575	-0,635	**-0,694**	-0,580	-0.466	-0,352	-0,238	-0,218
27	0,218	-0,311	-0,330	-0,348	**-0,367**	-0,294	-0,221	-0,147	-0,074	-0,218
28	0,218	-0,152	-0,139	-0,125	-0,112	-0,071	-0,030	0,012	0,053	-0,218
29	0,218	-0,038	-0,002	0,034	0,070	0,088	0,107	0,125	0,144	-0,218
30	0,218	0,030	0,080	0,129	0,179	0,184	0,189	0,194	0,198	-0,218
31	0,218	0,053	0,107	0,161	0,215	0,216	0,216	0,216	0,217	-0,218
Oznaczenie znaku sił osiowych: „+” – ściskanie, „-” – rozciąganie										

W wierszu 1 tab. 3 podano oznaczenie schematu dla którego prowadzono analizy. Schematy różniły się rozkładem siły osiowej na długości elementu. Rozpatrzono 10 schematów zmienności siły osiowej w stężanym pasie górnym rygla dachowego. W górnej części tab. 3. podano parametry α, β analizowanych schematów 1-10. W kolejnych wierszach tabeli podano siły osiowe w płatwiach i krzyżulcach stężenia od obciążeń imperfekcyjnych generowanych przez 1 stabilizowany pas górny rygla dachowego. W kolumnie 1 tab. 3. podano numer pręta analizowanej konstrukcji dachowej. Numerację prętów pokazano na rys. 9.

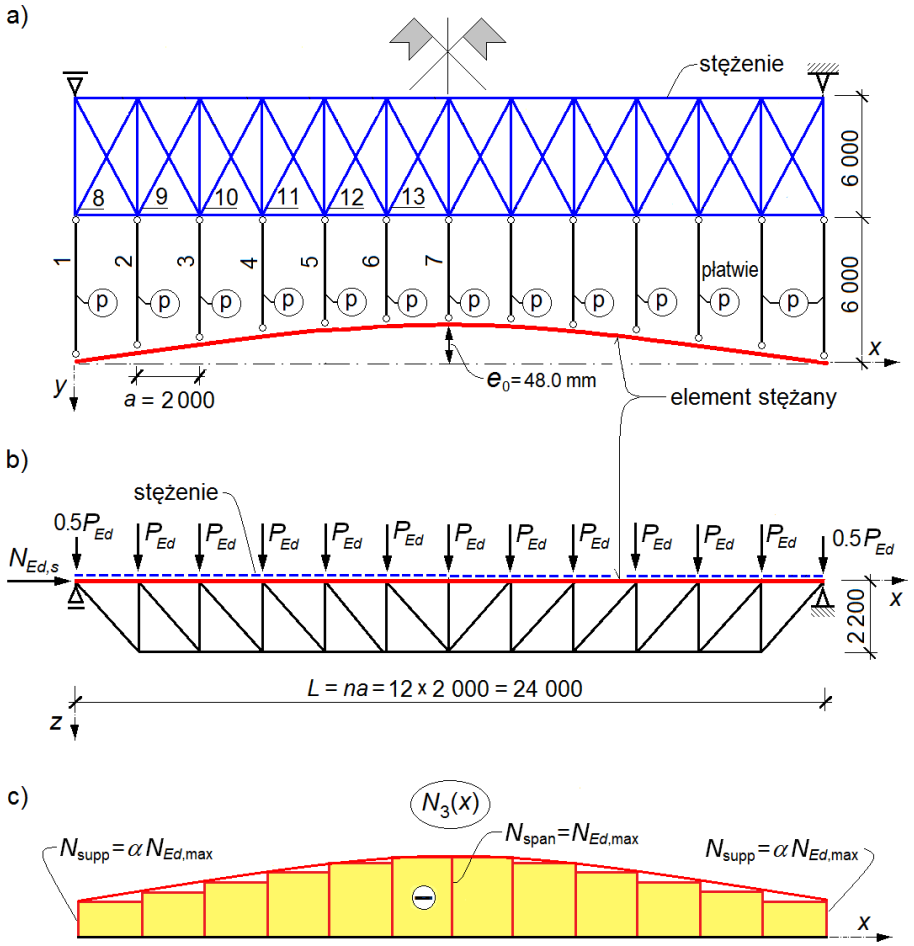
Kolejne ważne zagadnienie, decydujące o wytężeniu stężeń, pokazano na rys. 10. W tym przypadku siły podłużne w pasie górnym dźwigara dachowego od obciążenie poprzecznego q sumują się z siłami od działania suwnicy (V, H) i obciążeń od wiatru (w_p, w_n).



Rys. 10. Schemat: a) dźwigara dachowego połączonego przegubowo ze słupami, b), c) rozkład sił osiowych w pasie górnym dźwigara dachowego

W celu oceny wpływu zmienności sił podłużnych na końcach elementu stężanego na siły w płatwiach i krzyżulcach tężnika wykonano kolejne analizy parametryczne. Dla schematu statycznego jak na rys. 11 rozpatrzono 11 schematów zmienności siły osiowej w elemencie stężanym różniących się parametrem α (rys. 11c, 12a). Rozkłady przęsłowego obciąże-

nia imperfekcyjnego oraz towarzyszące im reakcje podporowe, które powstają w wyniku wytężenia stężanego elementu siłami osiowymi pokazano na rys. 12b, c. Siły osiowe w płatwiach i krzyżulcach od obciążeń imperfekcyjnych generowanych przez 1 stabilizowany pas górny dźwigara przedstawiono w tab. 4. W górnej części tab. 4 podano parametr α (rys. 11c) analizowanych schematów 1-11. W kolumnie 1 tab. 4 podano numer pręta badanej konstrukcji dachowej Numerację prętów pokazano na rys. 11a.

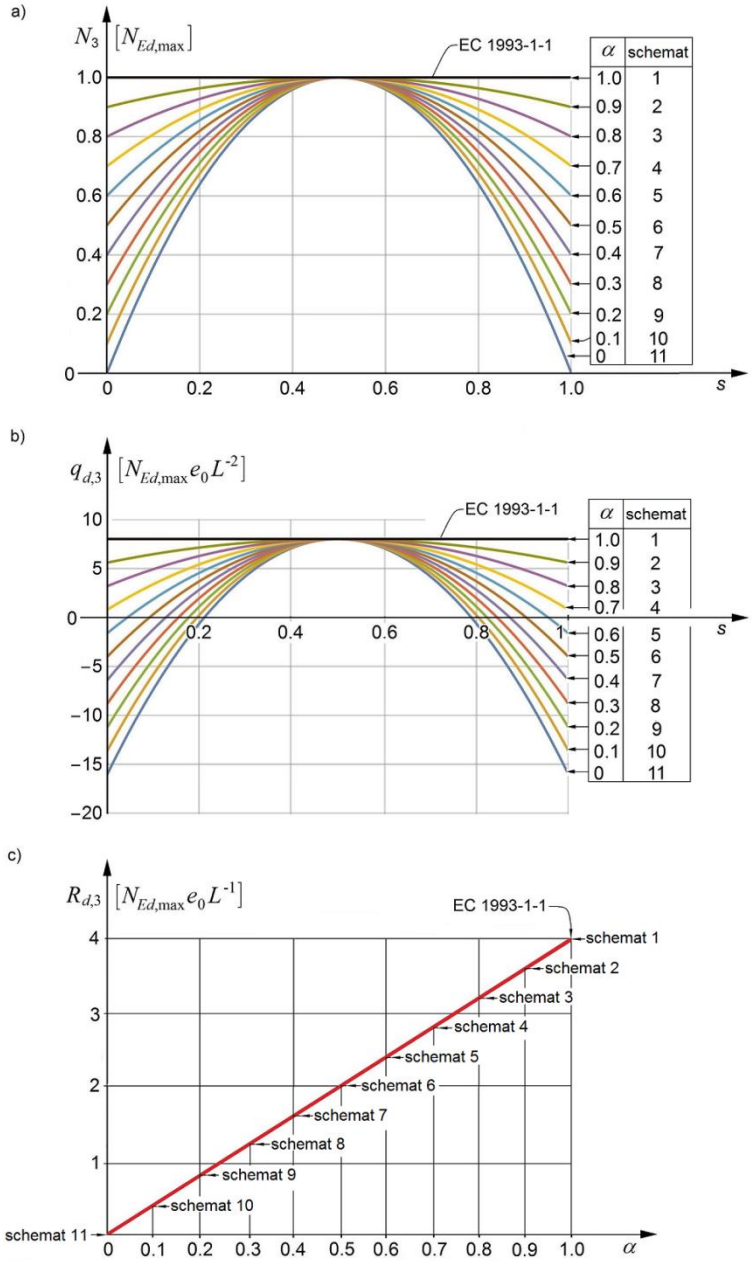


Rys. 11. Schemat: a) stężenia, b) dźwigara kratowego, c) rozkładu siły podłużnej w pasie stężanym kratownicy

Wykonane badania analityczne pozwoliły sformułować szereg wniosków, które szczegółowo opisano w [T1.6, T1.9]. Najistotniejsze wnioski to:

1. Uwzględnienie w modelu obliczeniowym parabolicznego, rzeczywistego rozkładu siły osiowej w stężanym elemencie skutkuje w stosunku do modelu zalecanego w EN 1993-1-1 [B7] zasadniczymi zmianami zarówno jakościowymi, jak i ilościowymi obciążeń imperfekcyjnych oraz sił osiowych w płatwiach i krzyżulcach stężenia.
2. Obciążenie imperfekcyjne jest nierównomierne i znakozmienne wzdłużnie (zmienia kierunek działania na długości elementu – rys. 7).

3. W zależności od schematu rozkładu siły podłużnej największe obciążenia imperfekcyjne mogą pojawić się na podporze i są nawet 4 razy większe od obciążenia wyznaczonego wg EN 1993-1-1 [B7].
4. Elementy rozciągane lub rozciągane strefy stężanych dźwigarów generują takie samo obciążenie imprfekcyjne jak pręty ściskane, tylko o przeciwnym znaku.
5. Przyjęcie w analizie parabolicznego, znakozmiennego rozkładu siły osiowej w stężanym elemencie (rys. 9) powoduje w stosunku do oceny wytężenia wg modelu w EN 1993-1-1 [B7] wzrost sił osiowych w płatwiach nawet o 218% lub spadek o 75% i zmniejszenie sił we wszystkich w krzyżulcach.



Rys. 12. Schematy: a) rozkładu siły osiowej, b) obciążenia od imperfekcji $q_{d,3}$, b) reakcji podporowych $R_{d,3}$ towarzyszących odciążeniu od imperfekcji $q_{d,3}$

Tablica 4. Siły osiowe w krzyżulcach stężenia oraz płatwiach w różnych przypadkach obciążenia imperfekcyjnego [kN] [T1.9]

Schemat	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**
α	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
Nr pręta	**Siły w płatwiach i krzyżulcach dla wybranych obciążeń imperfekcyjnych**										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Siły w płatwiach $F_{d,i}$ [kN]											
1	**-1,200**	**-1,099**	**-0,998**	**-0,898**	**-0,797**	**-0,696**	**-0,595**	**-0,494**	**-0,393**	**-0,293**	-0,192
2	0,218	0,173	0,127	0,081	0,036	-0,010	-0,055	-0,101	-0,147	-0,192	**-0,238**
3	0,218	0,189	0,160	0,131	0,101	0,072	0,043	0,013	-0,016	-0,045	-0,074
4	0,218	0,202	0,185	0,169	0,152	0,136	0,119	0,103	0,086	0,070	0,053
5	0,218	0,211	0,203	0,196	0,189	0,181	0,174	0,166	0,159	0,151	0,144
6	0,218	0,216	0,214	0,212	0,210	0,208	0,206	0,204	0,202	0,201	0,199
7	0,218	0,218	0,218	0,218	0,218	0,217	0,217	0,217	0,217	0,217	0,218
Siły w krzyżulcach $S_{d,i}$ [kN]											
8	**-1,265**	**-1,159**	**-1,052**	**-0,946**	**-0,840**	-0,734	-0,627	-0,521	-0,415	-0,308	-0,202
9	-1,035	-0,977	-0,918	-0,860	-0,802	**-0,744**	**-0,686**	**-0,627**	-0,569	-0,511	-0,453
10	-0,805	-0,778	-0,750	-0,723	-0,695	-0,668	-0,641	-0,613	**-0,586**	**-0,559**	**-0,531**
11	-0,575	-0,565	-0,555	-0,545	-0,535	-0,525	-0,515	-0,505	-0,495	-0,485	-0,475
12	-0,345	-0,343	-0,341	-0,339	-0,336	-0,334	-0,332	-0,330	-0,328	-0,326	-0,323
13	-0,115	-0,115	-0,115	-0,115	-0,115	-0,115	-0,115	-0,114	-0,114	-0,114	-0,114
Oznaczenia sił: „+” – ściskanie, „-” – rozciąganie											

Wygięcie o strzałce e_0 stężanego pasa oraz skręcenie płaszczyzny głównej dźwigara o kat ϕ_0 generują wspólnie odziaływanie imperfekcyjne przekazywane na płatwie stężenia. Dlatego w ocenie oddziaływań imperfekcyjnych należy sumować obciążania od wygięcia stężanego pasa q_{d3} i R_{d3} oraz skręcenia dźwigara H_i.

W celu ilościowej oceny łącznych oddziaływań imperfekcyjnych od wygięcia stężanego pasa o strzałce e_0 i skręcenia płaszczyzny głównej dźwigara o kąt ϕ_0 na wytężenie płatwi wykonano obliczenia dla kratownicy pokazanej na rys. 11b. Wyniki tych obliczeń przedstawiono w tab. 5. Podano w niej siły osiowe w płatwiach od oddziaływań imperfekcyjnych generowanych przez 1 stężaną kratownicę (rys. 11). W wierszach 3 i 4 tab. 5 podano siły w płatwiach odpowiednio od oddziaływań q_{d3} (dla α = 0,151) oraz od oddziaływań sił poziomych H_i, które wyznaczono od wygięcie pasa górnego (jak na rys. 5c).

Tablica 5. Siły osiowe w płatwiach od obciążenia imperfekcyjnego q_{d3} (dla α = 0,151) i sił H_i [kN] [T1.9]

Nr pręta		1	2	3	4	5	6	7
Siła osiowa od obciążenia [kN]	q_{d1}	-1,200	0,218	0,218	0,218	0,218	0,218	0,218
	q_{d3}	-0,346	-0,168	-0,030	0,078	0,155	0,201	0,217
	H_i	0	0,067	0,121	0,164	0,194	0,212	0,218
	$q_{d3} + H_i$	-0,346	-0,101	0,091	0,242	0,349	0,413	0,436
	$(q_{d3} + H_i) / q_{d1}$	0,288	0,463	0,417	1,100	1,601	1,894	**2,000**
Oznaczenia sił: „+" – ściskanie, „-" – rozciąganie								

Sumaryczne oddziaływanie $q_{d3} + H_i$ (wiersz 5 w tab. 5) powoduje w stosunku do obciążenia q_{d1} (wiersz 1 w tab. 5) wg EN 1993-1-1 [B7]:

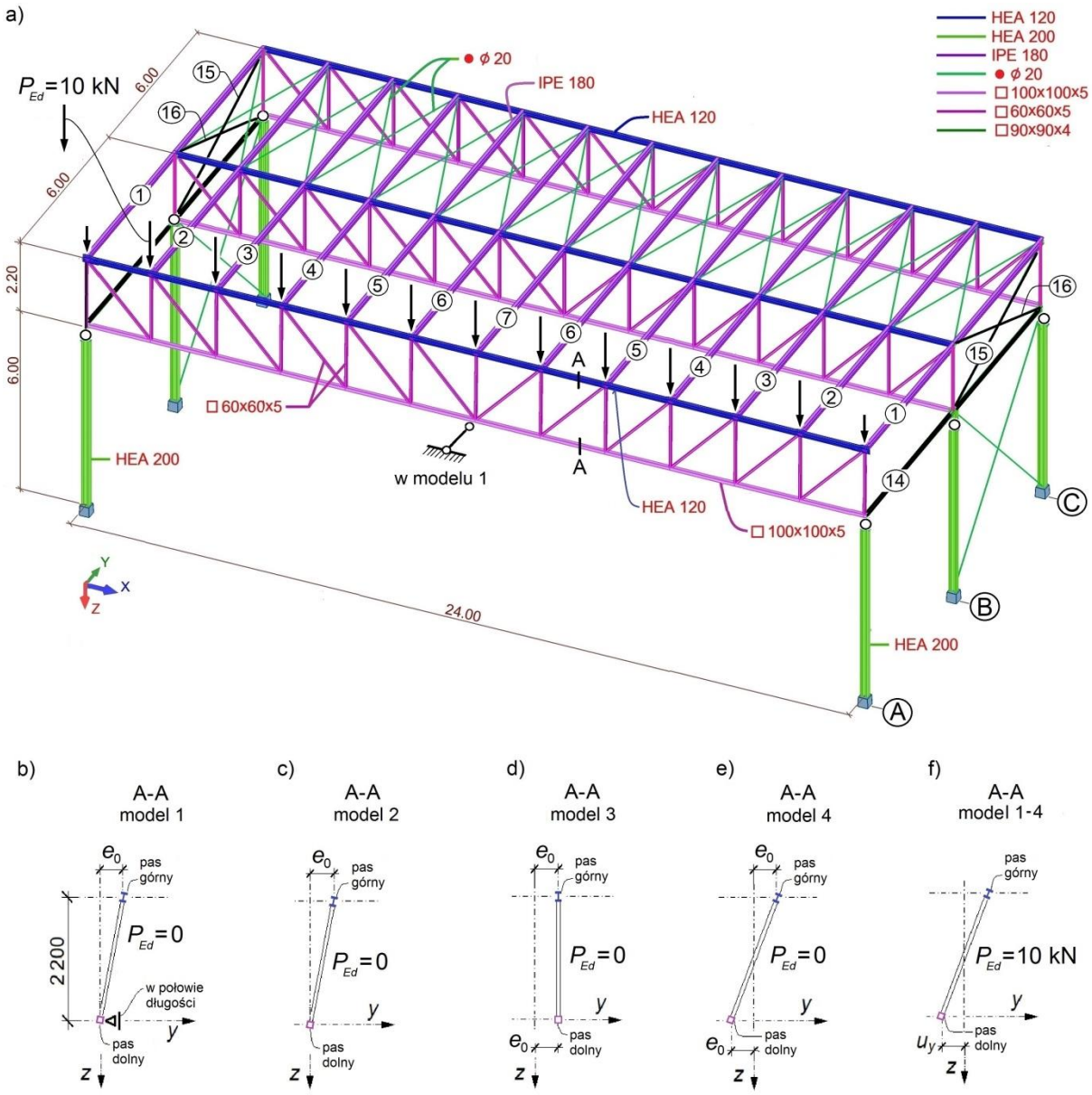
- wzrost sił osiowych w płatwiach strefy środkowej stężanego pasa kratownicy nawet o 100%,
- zmniejszenie sił osiowych w płatwiach strefy przypodporowej stężanego pasa górnego kratownicy nawet o 71%

Wykonane dodatkowe obliczenia stężeń obciążonych siłami $q_{d3} + H_i$ wykazały zmniejszenie sił w krzyżulcach w ich strefie przypodporowej i wzrost sił w krzyżulcach w strefie środkowej stężenia (od 18,4% do 48,7%) w stosunku do modelu wg EN 1993-1-1 [B7].

4.3.5. Weryfikacja numeryczna modeli analitycznych

Przedstawione w punktach 4.3.2 do 4.3.4 modele obliczeniowe wyznaczania obciążeń imperfekcyjnych dotyczą analizy „wyizolowanego" z konstrukcji stężanego pasa dźwigara, który jest ściskany parabolicznie wzdłużnie zmienną siłą osiową i ma strzałkę wstępnego wygięcia e_0 oraz analizy skutków skręcenia o kat ϕ_0 płaszczyzny głównej dźwigara. W tych modelach obliczeniowych, w celu wyjaśnienia sposobu generowania obciążeń imperfekcyjnych rozdzielano je na oddziaływania od wygięcia stężanego pasa o strzałce e_0 i oddziaływania od skręcenia o kąt ϕ_0 płaszczyzny głównej dźwigara. Jest sprawą oczywistą, że te oddziaływania sumują się interakcyjnie i w ocenie imperfekcyjnego wytężenia należy uwzględnić nieliniowość geometryczną ustroju. Ponadto oddziaływania imperfekcyjne zależą od rozwiązań konstrukcyjnych dźwigarów i stężeń, a także ich parametrów sztywnościowych (prętów, węzłów, połączeń). Oprócz uwzględniania losowego, łukowego wygięcia o strzałce e_0 stężanego pasa górnego należy też uwzględnić wygięcie pasa dolnego dźwigara (rys. 12d-f). Dlatego w ogólnym przypadku, w określaniu sił imperfekcyjnych stężanych dźwigarów należy stosować analizę GMNA (geometrycznie i materiałowo nieliniową) lub GMNIA (geometrycz-

nie i materiałowo nieliniową z imperfekcjami) modelu 3D, przyjmując rzeczywiste sztywności prętów oraz węzłów konstrukcji.



Rys. 13. Przestrzenny model konstrukcji dachu: a) schemat modelu numerycznego, b)-f) modele imperfekcji pasa górnego i dolnego kratownicy

Wykonano analizę numeryczną [T1.8] sił wewnętrznych w przestrzennej konstrukcji dachowej pokazanej na rys. 13. W analizowanej konstrukcji dachowej przyjęto strzałkę wstępnego wygięcia kratownicy e_0 = L/500 = 48 mm. Przyjęto, że krzyżulce i słupki kratownicy są połączone w sposób sztywny w obu kierunkach z ciągłymi pasami.

Wyznaczono numerycznie siły imperfekcyjne w konstrukcji przestrzennej (rys. 13) generowane przez stężany pas górny jednej kratownicy (w osi A na rys. 13a). Siły imperfekcyjne w płatwiach wyznaczone wg analizy sprężystej bez uwzględniania nieliniowości geometrycz-

nej LIA (wg teorii I rzędu) i analizy sprężystej geometrycznie nieliniowej GNIA (wg teorii II rzędu) podano w tab. 6.

Tablica 6. Wyniki analizy numerycznej przestrzennej konstrukcji dachowej [T1.8]

1	Analizowany model			Siły osiowe w płatwiach (numery prętów wg rys. 13a) [kN]							u_y (Rys. 13f) [mm]
				1	2	3	4	5	6	7	
2	analityczny		q_{d1}	**-1,200**	0,218	0,218	0,218	0,218	0,218	**0,218**	
3	analityczny		$q_{d3}+H_i$	-0,346	-0,101	0,091	0,242	0,349	0,413	**0,436**	
4	numeryczny	model 0	LIA	-0,349	-0,120	0,096	0,248	0,357	0,418	0,432	0
5	numeryczny	model 0	GNIA	-0,352	-0,122	0,098	0,254	0,367	0,430	**0,445**	0
6	numeryczny	model 1 (Rys. 13b)	LIA	-0,073	-0,295	-0,040	0,146	0,344	0,515	0,538	0
7	numeryczny	model 1 (Rys. 13b)	GNIA	-0,227	-0,322	0,039	0,237	0,395	0,509	**0,523**	0
8	numeryczny	model 2 (Rys. 13c)	LIA	0,309	-0,333	-0,043	0,110	0,267	0,358	0,398	-32,7
9	numeryczny	model 2 (Rys. 13c)	GNIA	-0,005	-0,510	-0,003	0,222	0,414	0,509	**0,540**	-24,1
10	numeryczny	model 3 (Rys. 13d)	LIA	0,860	0,081	0,029	0,000	0,008	0,012	0,079	-57,6
11	numeryczny	model 3 (Rys. 13d)	GNIA	**0,438**	-0,338	0,010	0,108	0,223	0,280	0,329	-38,1
12	numeryczny	model 4 (Rys. 13e)	LIA	-0,243	-0,585	-0,115	0,221	0,526	0,705	0,716	-7,7
13	numeryczny	model 4 (Rys. 13e)	GNIA	-0,447	-0,682	-0,015	0,336	0,605	0,737	**0,750**	-10,2
Oznaczenia: „+" – ściskanie, „-" – rozciąganie											

W wykonanych analizach numerycznych badano wariantową geometrię i usztywnienie boczne pasa dolnego kratownicy badając modele 0-4 pokazane na rys. 13b-f.

Rozpatrzono model 0, w którym pas dolny kratownicy jest prostoliniowy i jego wszystkie węzły dolne są przytrzymane bocznie (wiersze 4 i 5 w tab. 6). Model ten badano w celu weryfikacji rozwiązania analitycznego przedstawionego w punkcie 4.3.2 i 4.3.3 (wiersz 3 w tab. 6) dla schematu od obciążenia $q_{d3}+H_i$ (patrz wiersz 5 w tab. 6). Porównanie wartości sił w płatwiach od obciążenia $q_{d3}+H_i$ i wg modelu 0 wskazuję, że oszacowanie obciążeń imperfekcyjnych wg modeli analitycznych jest poprawne w świetle przyjętych w nich założeń obliczeniowych. Różnice wartości sił w płatwiach otrzymane analitycznie (wiersz 3 w tab. 6) i uzyskane numerycznie (wiersz 4 i 5 w tab. 6) wynikają m.in. niezgodności wartości siły osiowej w strefie przypodporowej tych modeli, a także zastosowanie w modelu numerycznym tężnika międzywiązarowego w strefie podporowej, składającego się z prętów 15 i 16 (patrz rys. 13).

W modelu 1 prostoliniowy pas dolny jest usztywniony bocznie stężeniem międzywiązarowym w środku rozpiętości kratownicy (rys. 13b; wiersz 6 i 7 w tab. 6). W modelach 2, 3 i 4 (rys. 13c-e) pasy dolne nie są usztywnione bocznie. W modelu 2 pas dolny jest prostoliniowy (rys. 13c; wiersz 8 i 9 w tab. 6). W modelu 3 pas dolny jest wygięty tak samo jak pas górny (rys. 13d; wiersz 10, 11 w tab. 6). W modelu 4 przejęto znakozmienne wygięcia pasów górnego i pasa dolnego (rys. 13e; wiersz 12, 13 w tab. 6).

Analiza wyników badań numerycznych przedstawionych w tab. 6 pozwala sformułować następujące wnioski:

- Z porównania rezultatów analizy liniowej i nieliniowej tj. wierszy 4, 6, 8, 10 i 12 (LIA) z wierszami 5, 7, 9, 11 i 13 (GNIA) w tab. 6 wynika, iż występują znaczne różnice wartości sił osiowych w płatwiach od obciążeń imperfekcyjnych. Są one m.in. skutkiem przemieszczania się bocznego niestężonego pasa dolnego (patrz wartości $\underline{u_y}$ w tab. 6) i skręcania płaszczyzny głównej kratownicy. Dlatego w ocenie oddziaływań imperfekcyjnych należy stosować nieliniową analizę modelu 3D konstrukcji.
- Analiza numeryczna modelu 3D wykazała, że w przypadku wygiętego pasa górnego i prostoliniowego pasa dolnego (model 2; wiersz 8, 9 w tab. 6), a także wygiętego znakozmiennie pasa dolnego (model 4; wiersz 12, 13 w tab. 6) powstają w płatwiach zdecydowanie większe (w stosunku do analitycznego oszacowania od obciążeń q_{d3}+H_i; wiersz 3 w tab. 6) siły w strefie środkowej stężanego pasa, które są miarodajne w wymiarowaniu płatwi.
- Powszechnie uważa się, że w analizach wytężenia konstrukcji prętowych istotne są obciążenia imperfekcyjne elementów ściskanych. Wykonane analizy wykazały, że elementy rozciągane (model 4), a także rozciągane strefy stężanych dźwigarów [T1.5, T1.7] generują oddziaływania imperfekcyjne jak elementy ściskane. Ich wartości mogą być większe od obliczonych EN 1993-1-1 [B7]. Na przykład uwzględnienie losowej imperfekcji wstępnego wygięcia rozciąganego pasa dolnego (model 4; wiersz 12, 13 w tab. 6) powoduje zwiększenie oddziaływań imperfekcyjnych w stosunku do modelu 2 bez imperfekcji pasa dolnego (model 2; wiersz 8, 9 w tab. 6).
- Wykonane badania numeryczne modeli 0-4 potwierdziły konieczność uwzględniania w identyfikacji oddziaływań imperfekcyjnych (proponowanych w modelach analitycznych) nie tylko skutków imperfekcji wstępnego wygięcia e_0, ale również rzeczywistego rozkładu wzdłużnej zmienności sił osiowych w stężanym pasie górnym dźwigara i skręcenia płaszczyzny głównej dźwigara.
- W przypadku przyjęcia takiej samej imperfekcji wstępnego wygięcia e_0 pasa dolnego i pasa górnego dźwigara (model 3, wiersz 10, 11 w tab. 6) występują mniejsze (w stosunku do modeli 0, 1, 2, 4) siły imperfekcyjne w płatwiach.
- Zarówno badania numeryczne modeli 0, 1, 2, 4, jak i obliczenia wg proponowanych modeli analitycznych (przedstawionych w pkt. 4.3.2 i 4.3.3) wykazały, że miarodajne do wymiarowania siły osiowe w płatwiach występują w płatwi środkowej (wiersze 3-9, 12, 13 w tab. 6), a nie w płatwi okapowej jak to wynika z obliczeń wg EN 1993-1-1 [B7] (wiersz 2 w tab. 6).

4.3.6. Uproszczenie normowej procedury wyznaczania obciążenia imperfekcyjnego

W EN 1993-1-1 [B7] podano wzór (1) do wyznaczania równoważnych oddziaływań imperfekcyjnych od losowych, łukowych wygięć elementów stężanych, o strzałce e_0. We wzorze tym po lewej stronie równania znajduje się obciążenie q_d po prawej zaś stronie δ_q, czyli ugięcie stężenia od wszystkich obciążeń zewnętrznych w tym także od poszukiwanej wartości obciążenia imperfekcyjnego q_d. Równanie zatem wymaga rozwiązania w sposób iteracyjny [B17, B4, B10, B14] aczkolwiek nie zawsze ta iteracja jest konieczna. Jednakże dla sprawdzenia poprawności wyniku iteracja powinna być przeprowadzona.

W publikacji [T1.1], zaproponowano podejście, które upraszcza nieliniowe równanie (1) do formy prostego równania liniowego (linearyzacja zagadnienia nieliniowego). Uproszczenie stało się możliwe po rozseparowaniu przemieszczenia δ_q we wzorze (1) na składową: δ_{qd} pochodzącą od przemieszczenia tężnika wywołanego obciążeniem imperfekcyjnym q_d oraz składową δ_z pochodzącą od pozostałych obciążeń zewnętrznych. Przy czym przemieszczenia δ_{qd} i δ_q wyznacza się na podstawie analizy pierwszego rzędu.

$$\delta_q = \delta_{qd} + \delta_z , \tag{11}$$

Następnie przemieszczenie δ_{qd} wyrażono w postaci

$$\delta_{qd} = \delta_{qd,1} q_d , \tag{12}$$

gdzie:

$\delta_{qd,1}$ – to przemieszczenie tężnika od obciążenia q_d =1 uzyskane z analizy pierwszego rzędu.

Uwzględniając zależności (11) i (12) we wzorze (1) i rozwiązując równanie otrzymuje się:

$$q_d = \frac{8\left(e_0 + \delta_z\right)\sum_{i=1}^{m} N_{Ed,i}}{L^2 - 8\delta_{qd,1}\sum_{i=1}^{m} N_{Ed,i}} , \tag{13}$$

Zależność (13) jest liniowa i pozwala na bezpośrednie i łatwe wyznaczenie wartości obciążenia q_d z pominięciem procesu iteracyjnego.

Zaproponowana zależność (13) może w pełni zastąpić wzór (1) podany w EN 1993-1-1 [B7], zwiększając szybkość i precyzję obliczeń obciążenia q_d wg procedury normowej. Należy rozważyć aplikację wzoru do normy EN 1993-1-1 [B7] jako alternatywną metodę wyznaczenia obciążenia q_d. Ponadto formuła (13) w sposób przejrzysty ujawnia czynniki mające bezpośredni wpływ na wartość obciążenia q_d. Są nimi sztywność tężnika połaciowego oraz wartość siły podłużnej w elemencie stężanym.

Na podstawie (13) można łatwo oszacować spotykany w praktyce zakres wartości obciążenia q_d.

$$q_d = (0{,}012 \div 0{,}056)\frac{\sum_{i=1}^{m} N_{Ed,i}}{L}. \qquad (14)$$

4.3.7. Podsumowanie

Jako znaczący wkład w rozwój dyscypliny naukowej budownictwo uważam rozwiązane przeze mnie, we wskazanym jako osiągnięcie naukowe cyklu publikacji, następujące problemy naukowe:

1) W stężanym pasie górnym dźwigara dachowego siła podłużna zmienia się zazwyczaj parabolicznie na długości elementu. Ta sytuacja nie odpowiada modelowi wyznaczania obciążeń imperfekcyjncyh q_{d1} i R_{d1} powszechnie stosowanemu wg zaleceń EN 1993-1-1 [B7]. W klasycznym modelu EN 1993-1-1 zakłada się m.in., że stężany element jest wytężony stałą na długości siłą ściskającą (patrz założenia Z1, Z2, Z3, pkt. 4.3.1), co jest typowe dla ściskanych słupów ram ale nie jest zgodne z rozkładem sił podłużnych w pasach dźwigarów dachowych. Te rozbieżności mogą prowadzić do błędnego oszacowania zastępczego obciążenia od imperfekcji q_d i błędnej oceny bezpieczeństwa płatwi i stężeń. W omówionym cyklu publikacji uogólniono model EN 1993-1-1 [B7] obliczania zastępczego obciążenia od imperfekcji q_d. Wyznaczono obciążenie od imperfekcji q_d w elementach o sile osiowej zmiennej parabolicznie lub „skokowo" parabolicznie na długości elementu stabilizowanego (pkt. 4.3.2). W ujęciu zaproponowanego modelu obliczeniowego model wyznaczania obciążenia q_d wg EN 1993-1-1 [B7] opisuje szczególny przypadek (α = 1, β = 1, γ = 1) z wielu możliwych rozkładów siły osiowej na długości elementu stężanego.
2) W stężanym pasie górnym dźwigara dachowego zamocowanego w słupach ramy (rys. 2d, f), od działania obciążeń grawitacyjnych, w środku jego rozpiętości pojawia się siła ściskająca a przy podporach siła rozciągająca (siła podłużna zmienia znak na długości pręta). Analogicznie w przypadku obciążenia ssaniem wiatru stężony pas górny może być rozciągany w środku rozpiętości i ściskany w pobliżu słupów. Powszechnie stosowany model EN 1993-1-1 [B7] oceny obciążenia imperfekcyjnego q_d nie pozwala na uwzględnienie takiego złożonego znakozmiennego rozkładu siły podłużnej w elemencie stężanym. Zaproponowany, w przedstawionym cyklu publikacji, uogólniony model wyznaczania zastępczego obciążenia od imperfekcji q_d umożliwia analizę stężonych prętów, w których siła podłużna zmienia znak (ściskanie, rozciąganie) na długości elementu. Ponadto w cyklu publikacji wykazano, iż elementy stabilizowane rozciągane na całej długości lub stabilizowane i rozciągane części dźwigarów dachowych generują takie sa-

me obciążenia imperfekcyjne na tężnik jak elementy ściskane, tylko o przeciwnym znaku.

3) Zaimplementowany w EN 1993-1-1 [B7] model obliczeniowy wymaga zastosowania procedury iteracyjnej do wyznaczania obciążenia imperfekcyjnego q_d. Wynika to z faktu, iż we wzorze (1) ugięcie δ_q jest funkcją poszukiwanego obciążenia q_d. Zatem po obu stronach równania (1) pojawia się obciążenie q_d i rozwiązanie równania wymaga co najmniej 2 kroków iteracji. Zaproponowana, w przedstawionym cyklu publikacji, formuła (13) umożliwia uproszczenie obliczeń stężeń eliminując z nich niewygodną procedurę iteracyjnego wyznaczania obciążenia imperfekcyjnego q_d. Formuła (13) może w pełni zastąpić procedurę EN 1993-1-1 [B7] zwiększając szybkość i precyzję obliczeń. W ocenie autora należy rozważyć aplikację proponowanej procedury do EN 1993-1-1 [B7] (np. w załączniku krajowym normy) jako alternatywną metodę wyznaczenia obciążenia imperfekcyjego zgodną z założeniami EN 1993-1-1 [B7].

Wnioski o charakterze szczegółowym podano w omówionym cyklu publikacji i w sposób syntetyczny w rozdziałach 4.3.4 i 4.3.5. Poniżej podano tylko najważniejsze konkluzje:

1) Wykonane analizy numeryczne wykazały, iż oszacowanie obciążeń imperfekcyjnych wg zaproponowanych, w omówionym cyklu publikacji, modeli analitycznych jest poprawne w świetle przyjętych w nich założeń obliczeniowych.
2) Przestrzenny model numeryczny obliczania stężeń pozwolił także zidentyfikować istotne czynniki wpływające na obciążenie od stabilizowanych dźwigarów dachowych. Są nimi: rozwiązania konstrukcyjne dźwigarów i stężeń, sztywności prętów, węzłów i połączeń, wielkość i kierunek wygięcie pasa dolnego dźwigara względem pasa górnego, rodzaj analizy modelu przestrzennego (geometrycznie i materiałowo liniowa i nieliniowa).
3) W celu wyjaśnienia fizyki wytężania konstrukcji i powstawania oddziaływań imperfekcyjnych w analizowanych modelach rozdzielano je na obciążenia od wygięcia stężanego pasa o strzałce e_0 oraz obciążenia od skręcenia płaszczyzny głównej dźwigara o kąt $\phi_0(x)$. Skutki tych obciążeń sumują się. W określaniu sumarycznych sił imperfekcyjnych można stosować analizę geometrycznie nieliniową prętowego modelu obliczeniowego 3D, uwzględniając rzeczywiste sztywności prętów oraz węzłów badanej konstrukcji.
4) W świetle wykonanych badań przedstawionych w osiągnięciu naukowym najbardziej odpowiedni i dokładny do analizy stężeń jest przestrzenny model prętowy konstrukcji uwzględniający efekty nieliniowości geometrycznej i materiałowej oraz sztywności zarówno elementów konstrukcji dźwigara, jak i stężenia. Jednak jest on trudny do zaakceptowania w powszechnym użyciu przez inżynierów z powodu tworzenia modeli obliczeniowych z różnymi kombinacjami imperfekcji dźwigara, co wiąże się z dużą pracochłon-

nością. Dlatego model wyizolowanego z konstrukcji pręta jest prostszy i bardziej akceptowalny do oszacowań inżynierskich nawet jeśli jest mniej precyzyjny.

5) Badania doświadczalne opisane w [B20] potwierdzają poprawność wniosków sformułowanych na podstawie proponowanych w [T1.1÷T1.9] modeli obliczeniowych. Badania (tab. 7) potwierdziły zmienny na długości i znakozmienny przy podporach charakter obciążenia od imperfekcji q_d. Ponadto stwierdzono w [B20], iż najlepszą zbieżność z wynikami badań doświadczalnych zapewnia analiza numeryczna. Modele obliczeniowe proponowane w [T1.7] i [B19] lepiej opisują charakter zmienności obciążeń imperfekcyjnych q_d od modelu EN 1993-1-1 [B7].

Tablica 7. Siły od stabilizacji w węzłach pasa górnego kratownicy [kN], [B20]

Wyniki	Numer węzła				
	0	1	2	3	4
Eksperyment wartość średnia [B20]	-0,05	-0,17	0,05	0,22	0,39
Wg EN 1993-1-1 [B7]	-0,42	0,12	0,12	0,12	0,12
Wg modelu z [B19]	-0,08	-0,07	0,08	0,23	0,26
Wg modelu z [T1.7] q_d (α=0, β=1, γ=0) + H_i	-0,10	-0,03	0,11	0,21	0,24
Analizy numeryczne [B20]	-0,05	-0,19	0,03	0,24	0,35

6) Zaproponowana metoda oceny obciążeń imperfekcyjnych z uwzględnieniem rzeczywistego parabolicznego rozkładu siły osiowej w stężanym, łukowo wygiętym (o strzałce e_0) elemencie i skręcenia o kąt Φ_0 płaszczyzny głównej dźwigara pozwala analizować w dokładniejszy sposób wytężenie płatwi i prętów stężeń. Przedstawione w cyklu publikacji ilościowe i jakościowe różnice oceny obciążenia q_d wg proponowanych modeli obliczeniowych i EN 1993-1-1 [B7] są znaczne. Np.: Jeśli rozkłady ściskającej siły osiowej w stężanych elementach są parabolicznie wzdłużnie zmienne (jak w analizowanych schematach 2-11, rys. 12; $\alpha < 1.0$) to ich przęsłowe obciążenia imperfekcyjne q_{d3} są nierównomierne i znakozmienne gdy $\alpha < 0.65$. Mogą one być także zdecydowanie większe od obciążenia q_{d1} wg EN 1993-1-1 [B7]. Dlatego należałoby rozważyć wprowadzenie (po dokonaniu dodatkowych analiz numerycznych) odpowiednich korekt dotyczących analizowanego zagadnienia w nowelizacji EN 1993-1-1 [B7].

Wykaz literatury

Symbolem T1.x oznaczono publikacje wchodzące w skład jednotematycznego osiągnięcia naukowego, symbolem [Bx] oznaczono w kolejności alfabetycznej pozostałe źródła powołane w punkcie 4.3.

[T1.1] Czepiżak D., *Uproszczona metoda obliczania poprzecznych stężeń dachowych*, Inżynieria i Budownictwo, nr 11/2013.

[T1.2] Czepiżak D. Biegus A., *Refined calculation of lateral bracing systems due to global geometrical imperfections*, Journal of Constructional Steel Research. 2016, vol. 119, s. 30-38.

[T1.3] Biegus A. Czepiżak D., *Uściślony model imperfekcyjnych obciążeń płatwi i stężeń*, Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury = Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture. 2016, t. 33, z. 63, nr 1, s. 307-314.

[T1.4] Biegus A., Czepiżak D., *Equivalent stabilizing force of the simply supported roof girders including the longitudinal variability of the compression force acting in the restrained chord*, Civil and Environmental Engineering Reports. 2017, vol. 25, nr 2, s. 43-57.

[T1.5] Biegus A., Czepiżak D., *Imperfection force of members under longitudinal action having a variable sign*, Ce/papers [Dokument elektroniczny]. 2017, vol. 1, nr 2/3, s. 3719-3728, Eurosteel, Copenhagen, Denmark, September 13-15, 2017.

[T1.6] Biegus A., Czepiżak D., *Obciążenie imperfekcyjne elementów wytężonych znakozmienną wzdłużnie siłą osiową*, Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury = Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture. 2017, t. 34, z. 64, nr 3, s. 371-386.

[T1.7] Biegus A., Czepiżak D., *Generalized model of imperfection forces for design of transverse roof bracings and purlins*, Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2018, vol. 18, nr 1, s. 267-279.

[T1.8] Biegus A., Czepiżak D., *Analytical and numerical research of equivalent stabilizing force of stiffened truss chords*, W: 64 Scientific Conference of the Committee for Civil Engineering of the Polish Academy of Sciences and the Science Committee of the Polish Association of Civil Engineers (PZITB) (KRYNICA 2018) : Krynica Zdrój, Poland, September 16-20, 2018 / K. Wilde and M. Niedostatkiewicz (Eds.). [Les Ulis] : EDP Sciences, 2019. art. 09003, MATEC Web of Conferences, vol. 262.

[T1.9] Biegus A., Czepiżak D., *Equivalent stabilizing force of members parabolically compressed by longitudinally variable axial force*, W: 64 Scientific Conference of the Committee for Civil Engineering of the Polish Academy of Sciences and the Science Committee of the Polish Association of Civil Engineers (PZITB) (KRYNICA 2018) : Krynica Zdrój, Poland, September 16-20, 2018 / K. Wilde and M. Niedostatkiewicz (Eds.). [Les Ulis] : EDP Sciences, 2019. art. 09004, MATEC Web of Conferences, vol. 262.

[B1] Biegus A., *Stalowe Budynki halowe*, Arkady, Warszawa 2009.

[B2] Biegus A., *Obciążenia imperfekcyjne poziomych stężeń poprzecznych dźwigarów wspornikowych i wieloprzęsłowych*, Inżynieria i Budownictwo nr 11/2011.

[B3] Biegus A., *Calculation of lateral bracing for cantilever and multispan girders*, Archives of Civil and Mechanical Engineering 13 (2013) 99–103.

[B4] Budownictwo ogólne tom 5., *Stalowe konstrukcje budynków. Projektowanie według eurokodów z przykładami obliczeń*, Arkady, Warszawa 2010.

[B5] Chen W.F., Atsuta T., *Theory of Beam-Column*, MacGraw- Hill, New York, 1961.

[B6] Davison B., Owens G.W., *Steel Designer's Manual, 7th ed*., The Steel Construction Institute, Wiley-Blackwell, 2012.

[B7] EN 1993-1-1:2005, *Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków*, CEN, Brussels 2005.

[B8] Gardner M., Nethercot D., *Designers Guide to EN 1993-1-1: Eurocode 3 Design of Steel Structures. Part 1-1: General Rules and Rules for Building*, (Series ed. H. Gulvanessian). Thomas Telford Limited, London 2005.

[B9] Giżejowski M., Barszcz A., Ślęczka L., *Projektowanie stężeń stalowych układów konstrukcyjnych wg PN-EN 1993-1-1*, Inżynieria i Budownictwo nr 11/2008.

[B10] Goczek J., Supeł Ł., Gajdzicki M., *Eurokod 3-1-1, 3-1-3, 3-1-5, 3-1-8. Przykłady obliczeń konstrukcji stalowych*, Politechnika Łódzka, 2010.

[B11] Gonçalves R., Camotim D., *On the incorporation of equivalent member imperfection in the in-plane design of steel frames*, Journal of Constructional Steel Research 61 (2005) 1226–1240.

[B12] Guo Y., Zhao S., Dou C., *Out-of-plane elastic buckling behavior of hinged planar truss arch with lateral bracings*, Journal of Constructional Steel Research 95 (2014) 290–299.

[B13] Iwicki P., *Sensitivity analysis of critical forces of trusses with side bracing*, Journal of Constructional Steel Research 66 (2010) 923–930.

[B14] Kozłowski A. (red.), *Konstrukcje stalowe. Przykłady obliczeń według PN-EN 1993-1. Część 1. Wybrane elementy i połączenia*, Rzeszów 2012.

[B15] Mathematica 11, Wolfram language & System Documentation 2018, Online Center

[B16] Mehri H., Crocetti R., Gustafsson P.J., *Unequally spaced lateral bracings on compression flanges of steel girders*, Structures 3 (2015) 236–243.

[B17] Owens G.W., Bureau A., Uppfeldt B., Muller C., Chica J., Galea Y., *Flow Chart: Design of a Wind Transverse Girder*, 2006 Access Steel, SF024a-EN-EU.

[B18] Pałkowski Sz., *Konstrukcje stalowe. Wybrane zagadnienia obliczania i projektowania*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2009.

[B19] Pałkowski Sz., Piątkowski M., *O obliczaniu poprzecznych stężeń dachowych*. Inżynieria i Budownictwo nr 4/2014.

[B20] Piątkowski M., *Impact of truss girder geometrical imperfections on roof bracing load*, W: 64 Scientific Conference of the Committee for Civil Engineering of the Polish Academy of Sciences and the Science Committee of the Polish Association of Civil Engineers (PZITB) (KRYNICA 2018) : Krynica Zdrój, Poland, September 16-20, 2018 / K. Wilde and M. Niedostatkiewicz (Eds.). [Les Ulis] : EDP Sciences, 2019. art. 09008, MATEC Web of Conferences, vol. 262.

[B21] RSA 2016, *Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2016 Podręcznik użytkownika*

[B22] Schneider, *Bautabellen für Ingenieure mit Berechnungshinweisen und Beispielen, 22. Auflage*, Bundesanzeiger Verlag, 2016.

[B23] SOFiSTiK 2016 - *Structural Desktop: User interface of SOFiSTiK software*. SOFiSTiK AG.

[B24] Taylor J.C. et all, *Interim Guidance on the Use of Eurocode 3: Eurocode 3 Part 1-1: for European Design of Steel Building Structures*, The Steel Con-struction Institute, Ascot 1995.

[B25] Timoschenko S.P., Gere J.M., *Theory of Elastic Stability*, Second Edition, McGraw-Hill, New York, 1963, 17th Printing 1985.

[B26] Trahair N.S., Bradford M.A., Nethercot D.A., Gardner L., *The Behavior and Design of Steel Structures to EC3*, Taylor and Francis, London-New York, 2008.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych

Moja działalność naukowa rozpoczęła się w 2001 jednocześnie z początkiem studiów doktoranckich na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej. Wtedy też zapoczątkowałem współpracę z prof. dr hab. inż. Antonim Biegusem.

Przed uzyskanie stopnia doktora moja praca naukowa skupiała się wokół tematyki:

- Nośności granicznej blach fałdowych, o schematach belek jedno- i wieloprzęsłowych, wzmocnionych w skutek zdwojenia przekroju. Problematyka ta stała się potem przedmiotem mojej pracy doktorskiej.
- Optymalizacji długości strefy wzmocnienia/zakładu wieloprzęsłowych blach fałdowych.
- Wpływu schematu statycznego i podatności lekkiej obudowy z blach fałdowych na jej wytężenie.
- Plastycznej rezerwy nośności blach fałdowych.

W tym okresie opublikowałem łącznie 18 artykułów i referatów konferencyjnych. Szczegółowy ich wykaz zamieszczono w tab. 4, Załącznik 5 do niniejszego wniosku.

W czasie przygotowywania rozprawy doktorskiej przeprowadziłem szerokie badania doświadczalne wzmocnionych i niewzmocnionych blach fałdowych. Istotną część badań wykonano w skali naturalnej 1:1. Opracowałem modele analityczne badanych zjawisk i zbudowałem modele numeryczne (ABAQUS), które umożliwiły pogłębione zrozumienie badanej problematyki.

Badania doświadczalne, które wykorzystano w pracy doktorskiej były wykonane w ramach projektu badawczego promotorskiego nr 4T07E05827 pt. *Nośność graniczna lokalnie wzmocnionych wieloprzęsłowych blach fałdowych*, realizowany od października 2004 do października 2006, organ finansujący Ministerstwo Nauki i Informatyzacji, 00-529 Warszawa, ul. Wspólna 1/3, Regon 015449139, NIP 526-26-83-994, charakter udziału habilitanta: wykonawca.

Z moją pracą doktorską można zapoznać się na stronach Dolnośląskiej Biblioteki Cyfrowej pod adresem https://www.dbc.wroc.pl/dlibra/publication/1244/edition/1488

Po uzyskaniu stopnia doktora w 2006 roku w sferze moich zainteresowań naukowych były:

- Nośność interakcyjna zginanych i dociskanych przekrojów lokalnie wzmocnionych blach fałdowych.
- Optymalizacja wielkoprzemysłowych blach fałdowych o lokalnie wzmocnionych przekrojach.
- Zagadnienia wzmacniania belek drewnianych wklejanymi taśmami CFRP, które miały być wstępem do zajęcia się zagadnieniami wykorzystania klejów do łącznia lub wzmacniania konstrukcji stalowych. Jednak ten kierunek badań nie został jak dotąd rozwinięty.

- Nośność plastyczna wielkoprzemysłowych blacha fałdowych.
- Nośność blacha fałdowych zginanych skupionym obciążenie od lokalnych podwieszeń np. pochodzących od instalacji mocowanych bezpośrednio do blach fałdowych.
- Uszczegółowienie modelu obliczania stężeń połaciowych poprzecznych. Te badania naukowe posłużyły do opracowania cyklu publikacji prezentowanych jako jednotematyczne osiągnięcia naukowe we wniosku habilitacyjnym.
- Projektowanie kratownic płaskich dachów bezpłatwiowych z zastosowanie blach trapezowych z uwzględnieniem zginania pasa górnego między węzłami oraz podparcia bocznego pasów dolnych kratownic przez blachę trapezową połączoną z pasem górnym.

Mój dorobek publikacyjny po uzyskaniu stopnia doktora (od 2006 r) wynosi 36 prac, w tym:

1) 6 prac z impact factor o łącznej sumie 10,331,
2) 23 prace na Liście MNiSW o łącznej sumie punktów 308
3) 10 prac zidneksowanych w bazie Web of Science
4) 7 prac zindeksowanych w bazie SCOPUS

Szczegółowy wykaz opublikowanych prac naukowych i aktywności naukowej z tego okresu znajduje się w załączniku 5 do niniejszego wniosku.

Liczba cytowanych publikacji według bazy Web of Science: 7, liczba cytowań: 46 (bez autocytowań)*.

Indeks Hirscha według bazy Web of Science: 3*

*Dane na podstawie raportu przekazanego przez Bibliotekę Główną Politechniki Wrocławskiej

Moja działalność naukowa i osiągnięcia naukowe została uhonorowane nagrodami:

1) Nagroda Ministra Budownictwa za pracę doktorską pt. „Nośność graniczna lokalnie wzmocnionych wieloprzęsłowych blach fałdowych” przyznana w konkursie „Nagrody i wyróżnienia Ministra Budownictwa za prace dyplomowe, doktorskie, habilitacyjne i publikacje w dziedzinie architektury, budownictwa, urbanistyki, gospodarki przestrzennej, mieszkaniowej i komunalnej oraz geodezji i kartografii w 2006 roku”.
2) Nagrody Rektora Politechniki Wrocławskiej w latach: 2013, 2014, 2017, 2018.

6. Dorobek dydaktyczny i popularyzatorski oraz informacja o współpracy międzynarodowej habilitanta

Opis osiągnięć dydaktycznych, współpracy z instytucjami naukowymi oraz działalności popularyzującej naukę znajduje się w załączniku 5 do wniosku.

6.1. Osiągnięcia dydaktyczne

- Prowadzenie od 2001 r wykładów, ćwiczeń projektowych i laboratoryjnych na studiach stacjonarnych i niestacjonarnych, inżynierskich oraz magisterskich z przedmiotów: Konstrukcje metalowe podstawy, Konstrukcje metalowe elementy i hale, Konstrukcje metalowe obiekty, Konstrukcje metalowe specjalne, Niezawodność i stany graniczne konstrukcji. Opracowywanie konspektów zajęć oraz prezentacji do wykładów.
- Udział w Programie Operacyjnym Wiedza Edukacja Rozwój, Priorytetu III. Szkolnictwo wyższe dla gospodarki i rozwoju, Działania 3.5 Kompleksowe programy szkół wyższych, współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego. Projekt „ZPR PWr – Zintegrowany Program Rozwoju Politechniki Wrocławskiej" o nr WND-POWR.03.05.00-00-Z301/17, realizowany przez Politechnikę Wrocławską. Okres trwania projektu: 01.10 - 31.12.2018. Charakter uczestnictwa: modyfikacja kart przedmiotu „Niezawodność i stany graniczne konstrukcji" na studiach stacjonarnych i niestacjonarnych.
- Byłem promotorem 35 prac dyplomowych inżynierskich i magisterskich oraz recenzowałem 40 prac dyplomowych na różnych stopniach studiów na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej. Jedna z prac magisterskich realizowana pod moją opieką zdobyła Drugą Nagrodę w konkursie „Na najlepszą pracę dyplomową opracowaną na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej w roku akademickim 2015"

6.2. Współpraca naukowa z instytucjami i przemysłem

- Recenzowanie publikacji w czasopismach międzynarodowych: ARCHIVES OF CIVIL AND MECHANICAL ENGINEERING, CIVIL AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING REPORTS
- Od 2000 r jestem członkiem Koła Polskiego Związku Inżynierów i Techników Budownictwa. W latach 2002-2008 byłem członkiem zarządu Koła Nr 1 przy Politechnice Wrocławskiej.

- Wygłoszenie wykładu pt. „*Obciążenia imperfekcyjne połaciowych stężeń poprzecznych”*, Zebranie Sekcji Konstrukcji Metalowych Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, kwiecień 2018 Warszawa
- Wygłoszenie wykładu pt. „Porównanie wymiarowania połączeń według IDEA StatiCa i normy PN-EN 1993-1-8” na I Konferencji Innowacyjne spojrzenie na projektowanie szczegółów w konstrukcjach stalowych, organizator JD Engineering, 21.03.2019 Wrocław.
- Obecnie trwa procedura ubiegania się o dofinansowanie w konkursie NCBIR Program Operacyjny Inteligentny Rozwój 2014-2020, Oś priorytetowa: Wsparcie prowadzenia prac B+R przez przedsiębiorstwa, Działanie: Projekty B+R przedsiębiorstw, Poddziałanie: Badania przemysłowe i prace rozwojowe realizowane przez przedsiębiorstwa, Numer naboru: 1/1.1.1/2019, tytuł: „Badania wraz opracowaniem innowacyjnej linii pilotażowej do produkcji energooszczędnych obiektów budowlanych w oparciu o innowacyjne płytowe prefabrykaty konglomeratu stalowych profili cieńkościennych i zamkniętokomorowej pianki pouliretanowej". Stanowisko: zastępca kierownika projektu B+R. Partner przemysłowy: Firma Steel Pur System Sp. z o.o., ul. Okólna 16A, 59-900 Zgorzelec, NIP 615-205-76-64

6.3. Inne formy aktywności

- Uzyskanie uprawnień w specjalności konstrukcyjno-budowlanej do projektowania bez ograniczeń, 2011, nr uprawnień 157/DOŚ/11
- Uczestnictwo w dziesięciu międzynarodowych i krajowych konferencjach naukowo-technicznych wraz z wygłoszeniem referatu.
- Równolegle do pracy naukowo-dydaktycznej współpracowałem z przemysłem w realizacji kilkudziesięciu projektów i innych opracowań inżynierskich, w tym także skomplikowanych przedsięwzięć realizowanych w ramach zamówień publicznych:
    1. **Dariusz Czepiżak,** MATEJKO I PARTNERZY BIURO KONSTRUKCYJNE, ul. Kaszubska 4, 50-214 Wrocław**,** *Terminal Pasażerski MPL we Wrocławiu wraz z infrastrukturą,* Wrocław 07.2007÷12.2010 – Zakres merytoryczny udziału: obliczenia statyczno-wytrzymałościowe i wymiarowanie konstrukcji stalowej hali terminalu dworca lotniczego, wydanie wytycznych do wykonania rysunków.
    2. **Dariusz Czepiżak,** MATEJKO & WESOŁY BIURO PROJEKTOWE S.C., ul. Purkyniego 1, 50-155 Wrocław, *Drugi terminal pasażerski w porcie lotniczym im. Lecha Wałęsy w Gdańsku wraz z obiektami towarzyszącymi i infrastrukturą,* Wrocław 02.2008÷12.2010 – Zakres merytoryczny udziału: obliczenia statyczno-

wytrzymałościowe i wymiarowanie konstrukcji stalowej hali terminalu dworca lotniczego, wydanie wytycznych do wykonania rysunków.

3. **Dariusz Czepiżak,** Pracownia Projektowa JAKON Jacek Grzelak, ul. Św. Antoniego 34, 50-073 Wrocław, *Rewaloryzacja i adaptacja obiektów zespołu Redity Napoleońskiej wraz z budową współczesnych obiektów kubaturowych i rekonstrukcją bramy południowej na terenie centrum Hewelianum w Gdańsku,* Wrocław luty 2018 – Zakres merytoryczny udziału: obliczenia statyczno-wytrzymałościowe budynku żelbetowego, wydanie wytycznych do wykonania rysunków.
4. **Dariusz Czepiżak**, Pracownia Projektowa JAKON Jacek Grzelak, ul. Św. Antoniego 34, 50-073 Wrocław, *Katowicki System Zintegrowanych Węzłów Przesiadkowych. Węzeł przesiadkowy Sądowa,* Wrocław sierpień 2018 – Zakres merytoryczny udziału: obliczenia statyczno-wytrzymałościowe i wymiarowanie konstrukcji stalowej wiaty peronowej, wydanie wytycznych do wykonania rysunków.

Dariusz Czepiżak