

DR INŻ. MACIEJ KOŻUCH

POLITECHNIKA WROCŁAWSKA
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA LĄDOWEGO I WODNEGO
KATEDRA KONSTRUKCJI BUDOWLANYCH

WYB. ST. WYSPIAŃSKIEGO 27, 50-370 WROCŁAW

Załącznik 3

AUTOREFERAT

dr inż. Maciej Kożuch

Wrocław, maj 2024

SPIS TREŚCI

1	<u>IMIE I NAZWISKO</u>	3
2	<u>POSIADANE DYPLOMY, STOPNIE NAUKOWE LUB ARTYSTYCZNE – Z PODANIEM PODMIOTU NADAJĄCEGO STOPIEŃ, ROKU ICH UZYSKANIA ORAZ TYTUŁU ROZPRAWY DOKTORSKIEJ</u>	3
3	<u>INFORMACJA O DOTYCHCZASOWYM ZATRUDNIENIU W JEDNOSTKACH NAUKOWYCH LUB ARTYSTYCZNYCH</u>	3
4	<u>OMÓWIENIE OSIĄGNIĘĆ, O KTÓRYCH MOWA W ART. 219 UST. 1 PKT. 2 USTAWY Z DNIA 20 LIPCA 2018 R. PRAWO O SZKOLNICTWIE WYŻSZYM I NAUCE (DZ. U. Z 2021 R. POZ. 478 Z PÓŹN. ZM.)</u>	4
4.1	OSIĄGNIĘCIE NR 1	5
4.2	OSIĄGNIĘCIE NR 2	30
4.3	OSIĄGNIĘCIE NR 3	44
5	<u>INFORMACJA O WYKAZYWANIU SIĘ ISTOTNĄ AKTYWNOŚCIĄ NAUKOWĄ ALBO ARTYSTYCZNĄ REALIZOWANĄ W WIECEJ NIŻ JEDNEJ UCZELNI, INSTYTUCJI NAUKOWEJ LUB INSTYTUCJI KULTURY, W SZCZEGÓLNOŚCI ZAGRANICZNEJ</u>	56
5.1	WSPÓLPRACA Z TOHOKU UNIVERSITY (JAPONIA)	56
5.2	STAŻ BADAWCZO – DYDAKTYCZNY W OSAKA INSTITUTE OF TECHNOLOGY (JAPONIA)	59
5.3	STAŻ BADAWCZO – DYDAKTYCZNY W TOHOKU UNIVERSITY (JAPONIA)	60
5.4	WSPÓLPRACA Z RÓŻNYMI OŚRODKAMI ZAGRANICZNYMI	62
5.5	WSPÓLPRACA Z DZIAŁEM R&D ARCELORMITTAL (LUKSEMBURG)	68
6	<u>INFORMACJA O OSIĄGNIĘCIACH DYDAKTYCZNYCH, ORGANIZACYJNYCH ORAZ POPULARYZUJĄCYCH NAUKĘ LUB SZTUKE</u>	69
6.1	OSIĄGNIĘCIA DYDAKTYCZNE	69
6.2	OSIĄGNIĘCIA ORGANIZACYJNE	70
6.3	OSIĄGNIĘCIA POPULARYZUJĄCE NAUKĘ	71
7	<u>INNE INFORMACJE DOTYCZĄCE KARIERY ZAWODOWEJ</u>	72
8	<u>BIBLIOGRAFIA</u>	74

1 IMIE I NAZWISKO

Maciej Kożuch

2 POSIADANE DYPLOMY, STOPNIE NAUKOWE LUB ARTYSTYCZNE – Z PODANIEM PODMIOTU NADAJĄCEGO STOPIEŃ, ROKU ICH UZYSKANIA ORAZ TYTUŁU ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

1. **26.06.2008 r.** – uzyskanie tytułu zawodowego magistra inżyniera w zakresie inżynierii budowlanej na kierunku budownictwo. Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego. Tytuł pracy magisterskiej: Garaż wielopoziomowy ze stropami o konstrukcji zespolonej stalowo – betonowej. Opiekun pracy: dr inż. Wojciech Lorenc, recenzent: prof. dr hab. inż. Ernest Kubica.
2. **06.03.2013 r.** – uzyskanie stopnia naukowego doktora nauk technicznych w dyscyplinie naukowej budownictwo. Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej. Tytuł rozprawy doktorskiej: Nośność stalowych łączników otwartych typu MCL w belkach zespolonych stalowo – betonowych. Promotor w przewodzie doktorskim: dr hab. inż. Wojciech Lorenc, recenzenci: prof. dr hab. inż. Kazimierz Rykaluk, prof. dr hab. inż. Henryk Zobel.

3 INFORMACJA O DOTYCHCZASOWYM ZATRUDNIENIU W JEDNOSTKACH NAUKOWYCH LUB ARTYSTYCZNYCH

1. **21.02.2011 – 31.01.2019:** asystent naukowo – dydaktyczny na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej.
2. **01.02.2019 – obecnie:** adiunkt badawczo – dydaktyczny na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej.

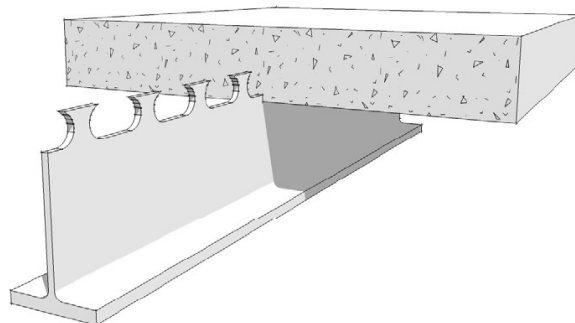
4 OMÓWIENIE OSIĄGNIĘĆ, O KTÓRYCH MOWA W ART. 219 UST. 1 PKT. 2 USTAWY Z DNIA 20 LIPCA 2018 R. PRAWO O SZKOLNICTWIE WYŻSZYM I NAUCE (DZ. U. Z 2021 R. POZ. 478 Z PÓŹN. ZM.)

Preambuła:

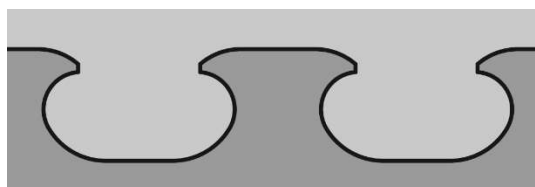
Obecne badania naukowe, które mają szansę na wdrożenia są na ogół prowadzone w dużych (często międzynarodowych) zespołach badawczych. Tak jest w przypadku rozwoju technologii belek zespolonych z połączeniem ścinanym typu CD, dlatego też większość moich dokonań indywidualnych stanowiło element większej całości. Opublikowane przeze mnie artykuły są w większości publikacjami dwu- lub wieloautorskimi, przy czym dla każdej z nich opisałem swój wkład własny.

W ramach niniejszego autoreferatu używano następujących skrótów i określeń, których znaczenie podano poniżej:

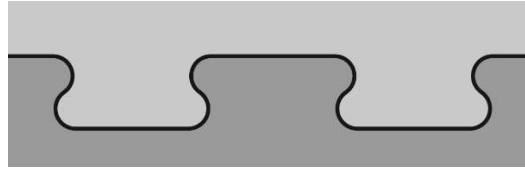
Połączenie ścinane typu CD – połączenie ścinane typu *composite dowels* między częścią stalową i betonową belki zespolonej (lub hybrydowej), w którym łączniki stalowe zostały wytworzone przez rozcięcie blachy lub profilu stalowego specyficzną linią cięcia w ten sposób, aby po ich zabetonowaniu, stanowiąc integralną część elementu stalowego, były w stanie przenosić siły rozwarstwiające (oraz ew. siły odrywające) występujące na styku stal-beton. Szkic połączenia przedstawiono poniżej:



Łącznik MCL (*modified clothoidal shape*) – łącznik typu CD o specyficznej geometrii, w ramach której powierzchnia czołowa łącznika stalowego została ukształtowana jako zmodyfikowana klotoida (zastąpienie klotoidy czterema kolejnymi odcinkami łuków kołowych, w którym każdy kolejny, licząc od podstawy łącznika, ma coraz mniejszy promień).

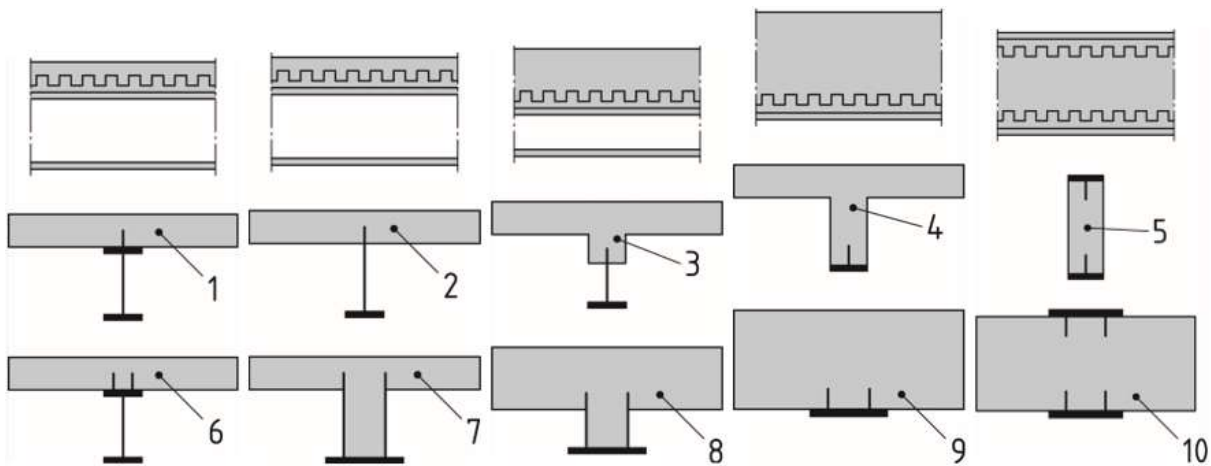


Łącznik PZ (*puzzle shape*) – łącznik typu CD o specyficznej geometrii przypominającej puzzle.



Element typu POST (*push-out standard test*) – element badawczy składający się z części stalowej z badanymi łącznikami oraz płyt betonowych, w których te łączniki pracują. Siła przyłożona do części stalowej jest transferowana przez łączniki na płyty betonowe, które przekazują ją dalej na podłoże. Łączniki w tej próbie są ścinane.

Element hybrydowy – element zespolony, w którym przekrój poprzeczny składa się oprócz części stalowej również z części betonowej o takim wymiarze, który gwarantuje znaczny udział w nośności na ścinanie poprzeczne całego elementu. Przekroje poprzeczne nr 1, 2 i 6 na szkicu poniżej będą konwencjonalnymi belkami zespolonymi, pozostałe – belkami hybrydowymi (definicja i szkic poniżej wg [14]).



4.1 Osiągnięcie nr 1

Tytuł osiągnięcia: Opracowanie modelu mechanicznego oraz podanie sposobu określania nośności sprężystej, granicznej i zmęczeniowej łącznika CD o kształcie MCL

- związane cyklem powiązanych tematycznie artykułów naukowych, zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2b ustawy

Przystępując do pisania rozprawy doktorskiej jako punkt wyjścia miałem pewne doświadczenia z początków projektu *Precobeam* – pierwszego projektu badawczego dotyczącego połączenia ścinanego typu CD:

- [1] G. Seidl, E. Viefhues, J. Berthelley, I. Mangerig, R. Wagner, W. Lorenc, **M. Kożuch**, J.-M. Franssen, D. Janssen, J. Ikäheimonen, R. Lundmark, O.

Hechler, N. Popa, Prefabricated enduring composite beams based on innovative shear transmission (Preco-Beam). RFSR-CT-2006-00030, Final report, EUR 25321 EN, 2013.

Ponieważ w ramach tego projektu idea łączników typu *composite dowels* była dopiero rozwijana, a żadne procedury badawcze takich łączników nie były ustanowione, rozwijałem warsztat badawczy, zarówno pod kątem prowadzenia badań doświadczalnych, jak i numerycznej analizy łączników. W tym czasie byłem współautorem 3 publikacji związanych z tematyką badań doświadczalnych:

- [2] W. Lorenc, E. Kubica, **M. Koźuch**, Metody oceny wytrzymałości łączników w innowacyjnym zespoleniu belek stalowo – betonowych. V Sympozjon: Kompozyty, konstrukcje warstwowe, Wrocław 2009, DWE 2009, s. 33-34.
- [3] W. Lorenc, E. Kubica, **M. Koźuch**, Testing procedures in evaluation of resistance of innovative shear connection with composite dowels. Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2010, vol. 10, nr 3, s. 51-63.
- [4] P. Harnatkiewicz, A. Kopczyński, W. Lorenc, **M. Koźuch**, Koncepcja projektowania i szacowania trwałości zmęczeniowej belek zespolonych z połączeniem ścinanym typu Composite Dowels. Górnictwo odkrywkowe. 2010, R. 51, nr 4, s. 105-110.

W ramach tych publikacji przedstawiłem metodykę prowadzenia pomiarów doświadczalnych elementów belkowych z łącznikami typu CD oraz opisałem koncepcję montażu czujników tensometrycznych na łącznikach, które miały potem służyć walidacji tworzonych modeli numerycznych. Przedstawiłem też wstępne wyniki badań ze wskazaniem sposobu ich interpretacji.

Ponieważ w 2009 udało się opracować nowy kształt łącznika (MCL), ale było już zbyt późno, aby kształt ten analizować dalej w ramach projektu *Precobeam*, podjąłem się zadania wyznaczenia współczynników koncentracji naprężeń zgodnie z *koncepcją nośności sprężystej* W. Lorenca (KNS). Współczynniki te miały stać się w przyszłości podstawą wymiarowania połączenia ścinanego na zmęczenie, oraz ewentualnie służyć ograniczeniu naprężeń w łącznikach do wartości naprężeń sprężystych (w sprawdzaniach SLS). W tym celu podjąłem się odpowiednich autorskich badań w obszarze statycznym (a S. Rowiński wykonywał równoległe badania cykliczne celem uzyskania pęknięć i potwierdzenia słuszności całej koncepcji zaproponowanej w habilitacji W. Lorenca, ale dla łączników MCL). W tym celu brałem udział w grantie MNiSW realizowanym wspólnie z Wydziałem Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej. Raport końcowy z tego projektu:

- [5] W. Lorenc, E. Rusiński, E. Kubica, K. Rykaluk, A. Kopczyński, P. Harnatkiewicz, **M. Koźuch**, S. Rowiński, Nośność zmęczeniowa ciągłych łączników otwartych. Raporty Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej. 2011, seria SPR nr 19.

Wspólnie z zespołem opublikowaliśmy wyniki naszych badań:

- [6] P. Harnatkiewicz, A. Kopczyński, **M. Koźuch**, W. Lorenc, S. Rowiński, Research on fatigue cracks in composite dowels shear connection. *Engineering Failure Analysis*. 2011, vol. 18, nr 5, s. 1279-1294.
- [7] S. Rowiński, **M. Koźuch**, Planowanie badań doświadczalnych konstrukcji zespolonych z ciągłymi łącznikami otwartymi. *Interdyscyplinarność badań naukowych 2011*, Oficyna wydawnicza PWr. 2011, s. 265-270.
- [8] W. Dudziński, G. Pękalski, P. Harnatkiewicz, A. Kopczyński, W. Lorenc, **M. Koźuch**, S. Rowiński, Study on fatigue cracks in steel-concrete shear connection with composite dowels. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2011, vol. 11, nr 4, s. 839-858.
- [9] **M. Koźuch**, S. Rowiński, W. Lorenc, E. Kubica, Model zniszczenia łącznika w zespoleniu typu composite dowels. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska*. 2012, z. 59, nr 3/II. S. 201-208.
- [10] S. Rowiński, **M. Koźuch**, Analizy numeryczne a badania doświadczalne na przykładzie łączników typu MCL w konstrukcjach zespolonych. *Interdyscyplinarność badań naukowych 2012*, Oficyna wydawnicza PWr. 2012, s. 401-404.

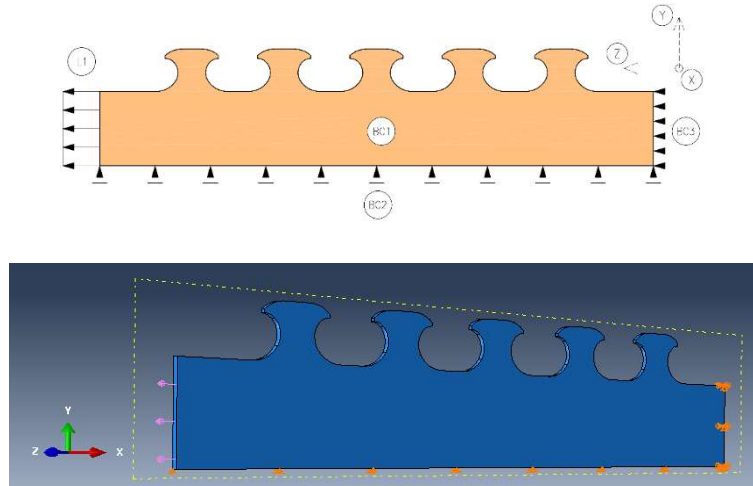
W ramach ww. publikacji przedstawiłem opracowaną koncepcję i projekt badań elementów belkowych z łącznikami MCL, metodykę prowadzenia pomiarów statycznych (oraz cyklicznych) belek, opisałem wstępne wyniki badań statycznych oraz przedstawiłem zbudowane przeze mnie wstępne modele numeryczne służące do określenia współczynników koncentracji naprężeń w łącznikach.

W tym czasie w ramach realizowanego projektu *Preco+* brałem udział w opracowywaniu pierwszych wytycznych projektowych konstruowania i obliczania belek zespolonych z połączeniem *composite dowels* – wykorzystywane były tutaj doświadczenia zdobyte w ramach realizacji projektu *Precobeam*.

- [11] G. Seidl, O. Hoyer, R. Zanon, N. Popa, W. Lorenc, S. Rowiński, **M. Koźuch**, J.-M. Franssen, T. Fohn, J. Quinchia, C. Hermosilla, A. Farhang, G. Nüsse, Prefabrykowane trwałe belki zespolone z innowacyjnym połączeniem ścinanym: wytyczne do projektowania. Wrocław: Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2012. RFCS RFS2-CT-2011-00026 *Preco+*, Final report.

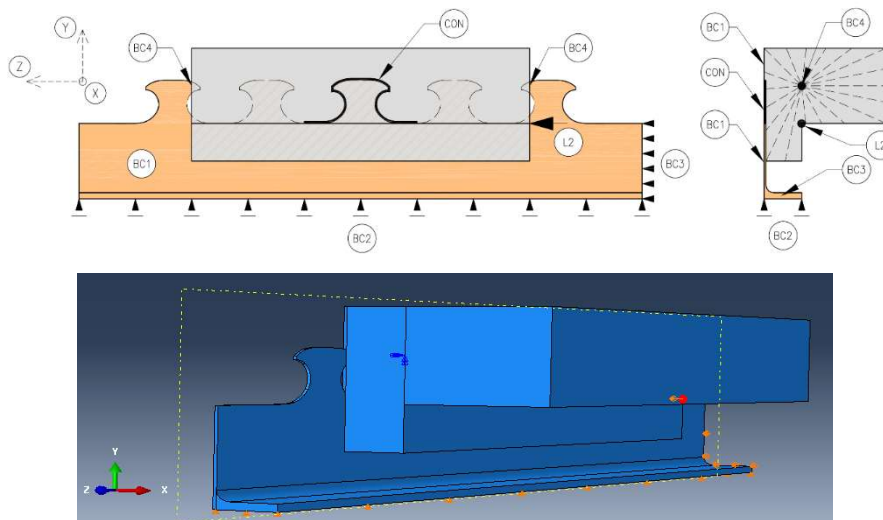
W ramach badań i prac własnych udało mi się wyznaczyć krzywe interakcyjnej nośności łącznika MCL poddanego jednoczesnemu działaniu (u podstawy łącznika) globalnych naprężeń normalnych o dowolnym znaku w belce stalowej i sił ścinania podłużnego (tzw. „pętle” nośności łącznika typu *composite dowels*, w tym przypadku dla kształtu łącznika MCL 115/250, gdzie wysokość łącznika 115 mm, rozstaw łączników 250 mm, ale zastosowane podejście mogłoby być użyte wprost dla dowolnego kształtu łącznika pracującego w analogiczny sposób). Wykonane analizy były zgodne ze wspomnianą wcześniej koncepcją nośności sprężystej, której głównym założeniem było rozdzielenie naprężeń powstających w łączniku na te wynikające bezpośrednio z sił ścinania podłużnego działających na łącznik (efekt lokalny) oraz na te, które u podstawy łącznika są efektem globalnych sił (momentu zginającego i siły osiowej) występujących w belce (efekt globalny). Naprężenia w belce u podstawy łącznika, a będące efektem sił

globalnych, przekładają się bowiem bezpośrednio na stan naprężeń w łączniku, który jest integralną częścią środnika belki stalowej. Zbudowałem 2 modele wycinkowe służące do wyznaczenia stanu naprężeń w łączniku od ww. efektów. Dla analizy efektu globalnego był to model odzwierciedlający blachę z łącznikami, poddany działaniu naprężeń rozciągających (model A).



Rys. 1 Model wycinkowy dla oceny wpływu efektów globalnych na stan naprężeń w łączniku (model A)

Dla analizy efektu lokalnego model przedstawiał wycinek belki (model B). Zbudowany był on z tożsamej blachy, co model A, usztywnionej u podstawy blachą stalową (półką dolną) i połączonej z płytą betonową w obrębie jednego łącznika zagadnieniem kontaktowym między stalą i betonem. Obciążenie w rozważanym modelu stanowi siła przyłożona do bloku betonowego, która poprzez ścinanie łącznika przekazana była na element stalowy.

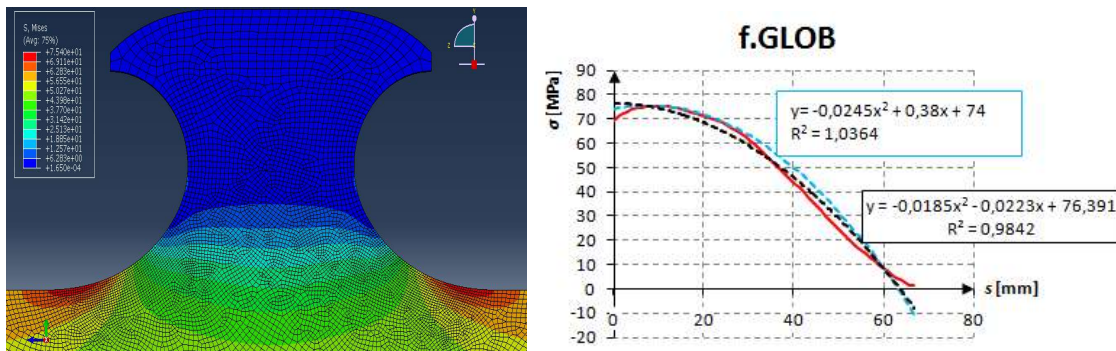


Rys. 2 Model wycinkowy dla oceny wpływu efektów lokalnych na stan naprężeń w łączniku (model B)

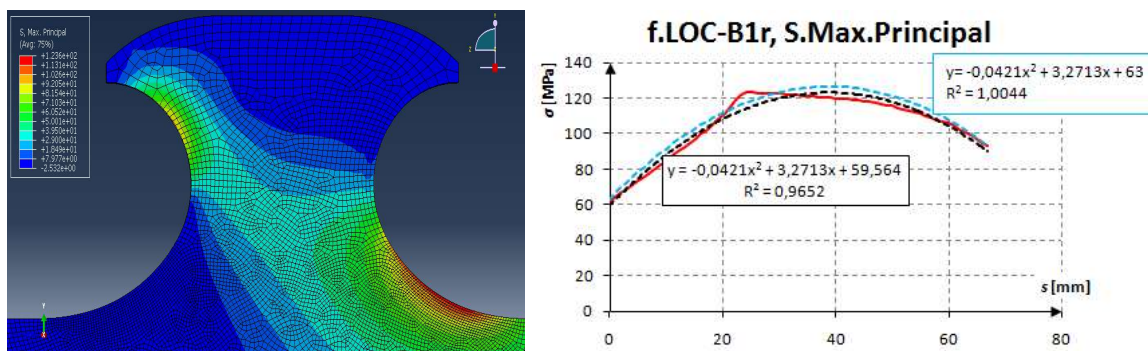
Analizy wykonywane były w środowisku Abaqus. Analizy zmienności wyników wykonywane były w zakresie:

- rodzaju elementów skończonych (C3D6, C3D15, C3D8, C3D8R, C3D20, C3D20R),
- wielkości elementów skończonych w obrębie krawędzi łącznika i kontaktu między stalą i betonem (1, 2, 4, 8, 16 mm),
- definicji zagadnienia kontaktowego (finite / small sliding formulation),
- zmienności modułów sprężystości podłużnej stali (200 – 210 GPa) i betonu (32 – 41 GPa, z redukcją w zakresie szacowanego pełzania betonu do 10 GPa),
- współczynników tarcia na kontakcie stali i betonu (od 0.0 do 0.5).

Po ustaleniu docelowych parametrów modeli wyznaczono rozkład naprężeń na ich krawędziach. Mapy naprężeń (na przykładzie naprężeń głównych), ich rozkład wzdłuż krawędzi łącznika oraz aproksymację tych naprężeń wielomianem drugiego stopnia przedstawiono poniżej, osobno dla modelu A (wpływ naprężeń globalnych) oraz modelu B (wpływ ścinania podłużnego między stalą i betonem).



Rys. 3 Mapa naprężeń głównych oraz ich rozkład i aproksymacja wielomianem 2-go stopnia (model A)



Rys. 4 Mapa naprężeń głównych rozciągających oraz ich rozkład i aproksymacja wielomianem 2-go stopnia (model B)

Mając zdefiniowane funkcje opisujące rozkład naprężeń (głównych lub zredukowanych) na krawędzi łącznika postępowano jak następuje:

- określono funkcję $f(s)$ będącą sumą efektów globalnych i lokalnych:

$$f(s) = A_{G,i}(s) \cdot \sigma_G + A_{L,i}(s) \cdot \frac{v_L}{t_w},$$

gdzie:

- A_G i A_L – wielomiany drugiego stopnia opisujące rozkład naprężeń wzdłuż krawędzi łącznika od jednostkowych naprężeń globalnych u podstawy łącznika i jednostkowych sił ścinania podłużnego,
 $i = M$ (naprężenia zredukowane) lub G (naprężenia główne),
 σ_G – naprężenia globalne u podstawy łącznika,
 v_L – siła ścinania podłużnego na 1 m długości,
 t_w – grubość środnika (grubość łącznika stalowego)

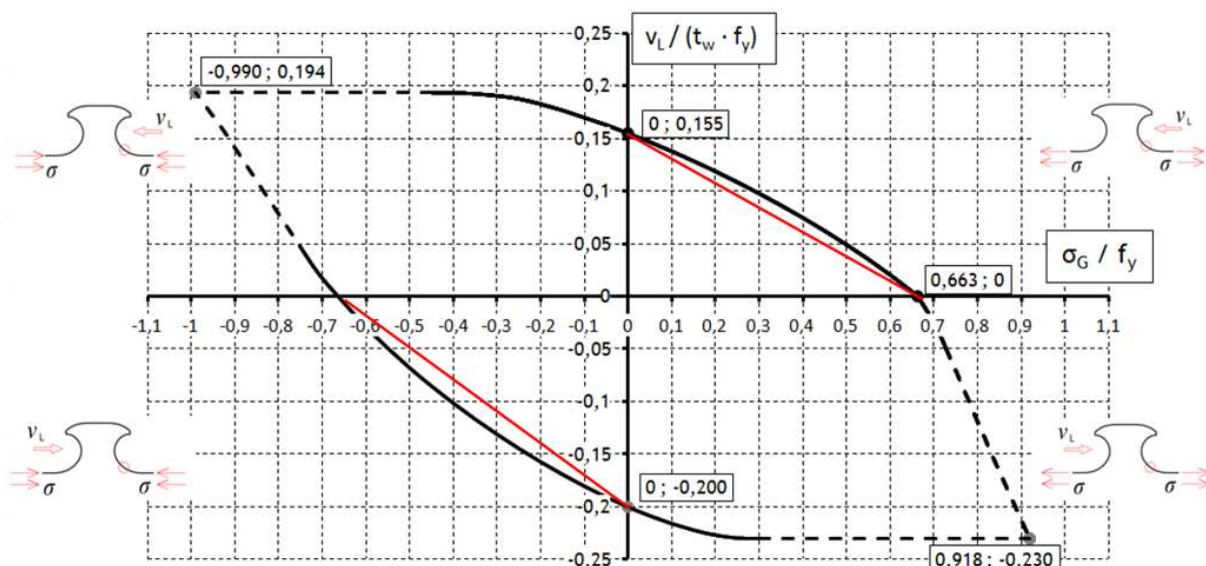
- zróżniczkowano funkcję $f(s)$ i porównano ją do 0 celem określenia współrzędnej $s = s_{max}$, dla której wartości naprężeń są ekstremalne:

$$\frac{\partial f(s)}{\partial s} = 0 \rightarrow s_{max} = g\left(\sigma_G, \frac{v_L}{t_w}\right),$$

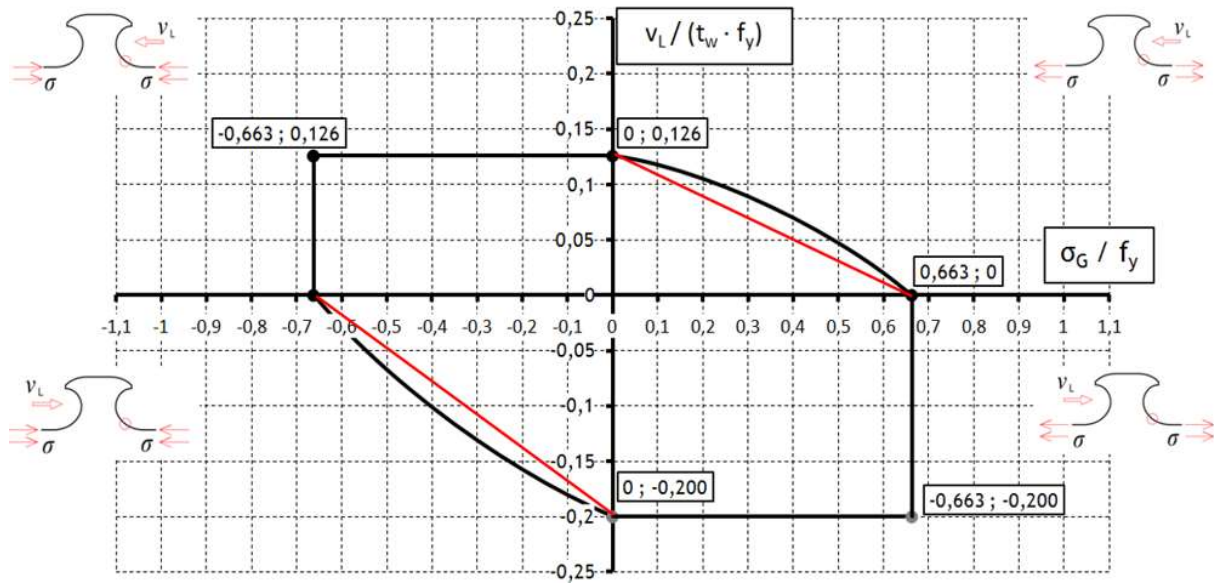
- wyznaczono równanie funkcji $f(s_{max})$ określając tym samym wartości naprężeń maksymalnych na krawędzi łącznika w funkcji sił globalnych działających na belkę (M , N i V):

$$f(s_{max}) = f\left(\sigma_G, \frac{v_L}{t_w}\right).$$

Wyniki tych analiz przedstawiono graficznie w postaci krzywych interakcyjnych nośności łącznika MCL w układzie naprężeń głównych (do określania żywotności zmęczeniowej) oraz zredukowanych (do określania nośności sprężystej).



Rys. 5 Obwiednia nośności łącznika MCL dla naprężeń głównych



Rys. 6 Obwódca nośności łącznika MCL dla naprężeń zredukowanych

W postaci analitycznej wyniki analizy można przedstawić w postaci równań:

$$\sigma = k_{G,red} \cdot \left(\frac{M_y \cdot z}{I_y} + \frac{N}{A} \right) + k_{L,red} \cdot \frac{V_z \cdot S_y}{I_y \cdot t_w}$$

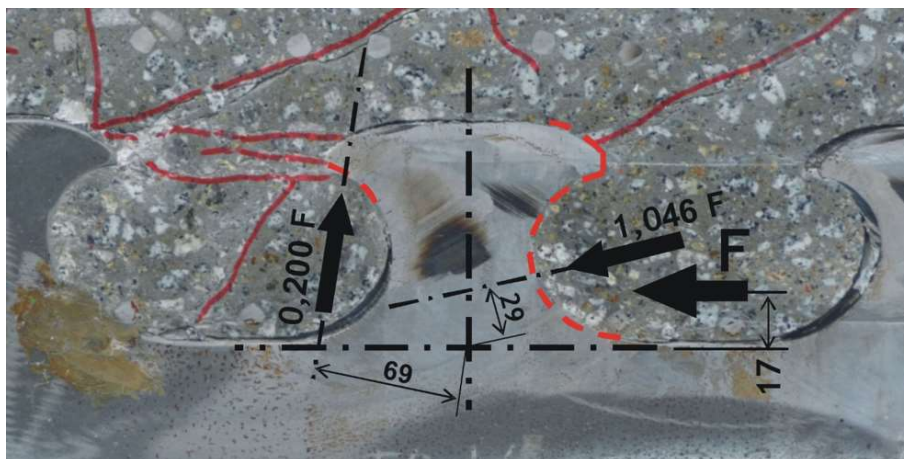
$$\Delta\sigma = k_{G,1} \cdot \left(\frac{\Delta M_y \cdot z}{I_y} + \frac{\Delta N}{A} \right) + k_{L,1} \cdot \frac{\Delta V_z \cdot S_y}{I_y \cdot t_w}$$

przy czym wartości współczynników koncentracji naprężeń $k_{G,i}$ i $k_{L,i}$ podano dla każdej kombinacji znaków sił wewnętrznych (ściskanie / rozciąganie po danej stronie krawędzi łącznika).

Równolegle prowadzone prace S. Rowińskiego, opisane m.in. w jego rozprawie doktorskiej [12], a realizowane w ramach wspólnego grantu badawczego [5], wykazały, że pęknięcia zmęczeniowe występują dokładnie w miejscach wyznaczonych przez mnie koncentracji naprężeń.

- [12] S. Rowiński, Wytrzymałość zmęczeniowa łącznika stalowego w innowacyjnym zespoleniu belki stalowo-betonowej. Raporty Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej. 2012, seria PRE nr 4.

Wykorzystując zaproponowaną przez W. Lorenca koncepcję (że układ naprężeń dociskowych z betonu działających na ząb można sprowadzić do dwóch sił) dokonałem odpowiednich analiz numerycznych wyznaczając położenie wypadkowej siły działającej na łącznik, która okazała się być znacząco niżej aniżeli dotychczas przyjmowano. Wypadkowa siła docisku betonu do łącznika stalowego jest uzależniona od rozkładu ciśnienia docisku na całym obwodzie łącznika (nie tylko z przodu – z kierunku występowania siły ścinającej, ale też na tylnej części łącznika, o którą deformujący się łącznik się zapiera).



Rys. 7 Model mechaniczny łącznika MCL

Wyniki prac przedstawiłem w swojej rozprawie doktorskiej:

- [13] **M. Kozuch**, Nośność stalowych łączników otwartych typu MCL w belkach zespolonych stalowo – betonowych. Raporty Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej. 2012, seria PRE nr 3.

Udowodniłem tym samym, że model niemiecki przedstawiany we wcześniejszych publikacjach, m.in.:

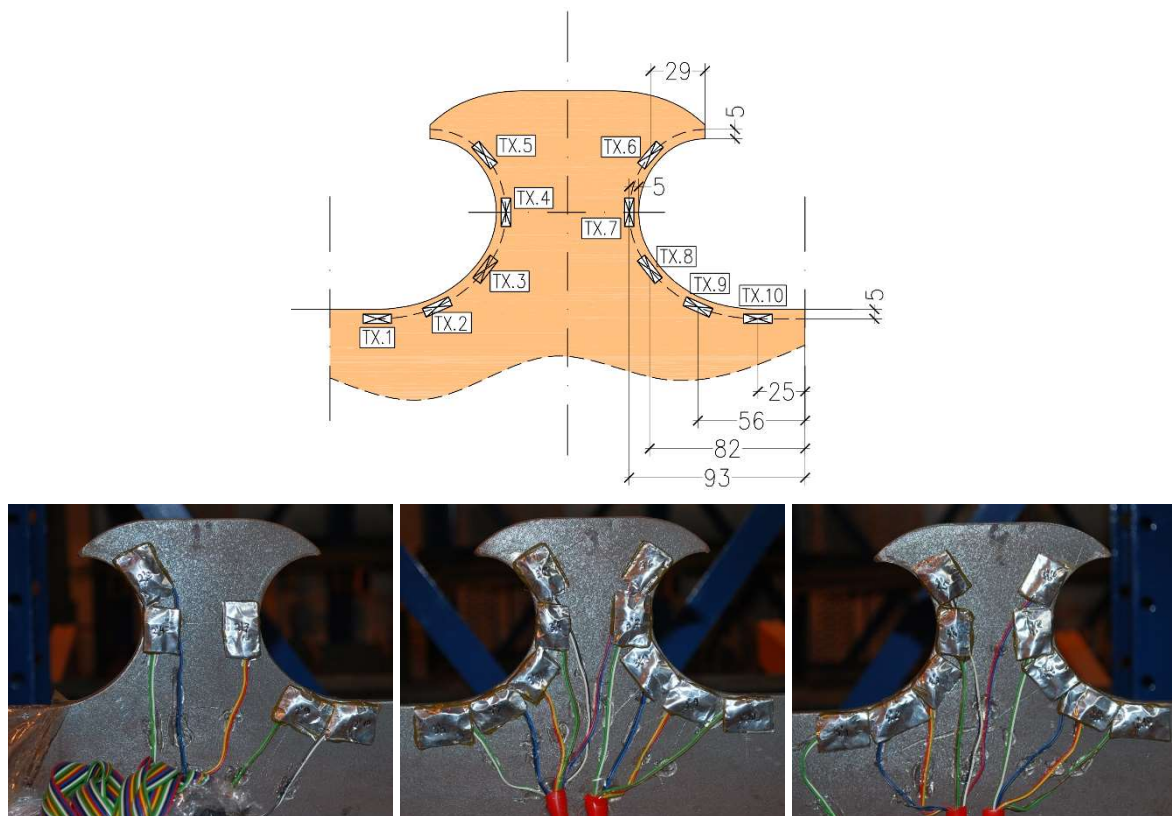
- [14] G. Seidl, Verhalten und Tragfähigkeit von Verbunddübeln in Stahlbetonverbundträgern, Dissertation, Raport serii PRE nr. 4/2009, Technische Universität Breslau, 2009.
- [15] S. Heinemeyer, Zum Trag- und Verformungsverhalten von Verbundträgern aus ultrahochfestem Beton mit Verbundleisten. Dissertation, Institut für Massivbau, RWTH Aachen, Aachen, 2011.
- [16] Feldmann, M., et al: Neue Systeme für Stahlverbundbrücken – Verbundfertigteilträger aus hochfesten Werkstoffen und innovativen Verbundmitteln. Research report, FOSTA P804, Düsseldorf, 2012.
- [17] M. Claßen, Zum Trag- und Verformungsverhalten von Verbundträgern mit Verbunddübeln und großen Stegöffnungen, Fakultät für Bauingenieurwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Dissertation, 2016.
- [18] Kopp M. et al., Composite dowels as shear connectors for composite beams – Background to the design concept for static loading / Journal of Constructional Steel Research 147 (2018), 488–503,

który zakładał równomierny rozkład docisku betonu do powierzchni łącznika, i to wyłącznie od strony działania siły ścinania podłużnego, był niepoprawny.

Było to zamknięciem spójnej koncepcji obejmującej:

- model mechaniczny (z pokazaniem układu sił działających na łącznik),

- wyznaczone za pomocą MES współczynniki służące do wyznaczania naprężeń sprężystych (zredukowanych oraz głównych),
- wyznaczone za pomocą MES współczynniki do określenia nośności granicznej łącznika,
- potwierdzenie eksperymentalne wyznaczonych współczynników (bezpośredni pomiar tensometryczny odkształceń w wielu miejscach łączników dla różnych geometrii belek oraz porównanie z odkształceniami wyznaczonymi numerycznie na modelach służących do wyprowadzenia współczynników koncentracji naprężeń, a także dla nośności granicznej wyniki prób typu POST).



Rys. 8 Układ tensometrów na łącznikach MCL (projekt oraz tensometry przyklejone na łącznikach jednej z badanych belek)

Koncepcja rozmieszczania tensometrów, którą przyjąłem została przedstawiona badaczowi niemieckiemu (G. Seidl), który zastosował ją w analogiczny sposób w badaniach sprawdzających [16] prowadzonych w Niemczech. Niemcy w swojej aprobacie:

- [19] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-26.4-56 Verbunddübelleisten, Deutsches Institut für Bautechnik.

przyjęli współczynniki (po bardzo niewielkich korektach) odpowiadające zasadom pracy łączników zgodnie z moimi analizami, a obecnie są one przyjęte w nowych Europejskich przepisach projektowania [19], [20] i wszystkie mosty które powstały, począwszy od pierwszego mostu przez Wierną Rzekę, zostały zaprojektowane i są projektowane wg tych wartości.

Wspomniane korekty wartości współczynników przyjęte w aktualnych przepisach to dla współczynnika koncentracji naprężeń od efektów globalnych zmiana z 1.51 (wyznaczony przeze mnie) na 1.5, a współczynnik koncentracji naprężeń dla efektów lokalnych został zmieniony z 6.45 (wyznaczony przeze mnie) na 7.3 – ta około 10% zmiana wynika z kwestii ostatecznej zmiany geometrii łącznika przyjętego w aprobacie przez Niemców, tj. zredukowaniu jego wysokości ze 115 mm do 100 mm, prowadząc tym samym do pogorszenia warunków pracy łącznika, ale jednocześnie zmniejszenia jego wysokości, co przekłada się na pewne korzyści przy produkcji belek typu *Precobeam*.

Udowodnienie za pomocą badań i MES jak pracuje łącznik MCL i podanie wartości współczynników do określania nośności sprężystej, granicznej i zmęczeniowej uważam za swój znaczący wkład w dyscyplinę.

Poniżej przedstawiam fragment aktualnie opracowywanych wytycznych projektowych w ramach Europejskiej Specyfikacji Technicznej:

[20] prCEN/TS 1994-1-102:2024 Eurocode 4 – Design of composite steel and concrete structures – Part 1-102: Composite Dowels, Draft version.

(5) The structural steel fatigue assessment should be in accordance with EN 1993-1-9 using the geometric stress in the steel connector. The geometric stress range should be the sum of stresses due to longitudinal shear forces (local effects) and normal stresses in the steel part of the composite section at the steel dowel base (global effects). It should include appropriate stress concentration factors. For a composite beam using composite dowels the stress range for the steel connectors should be calculated using Formula (A.31).

$$\Delta\sigma = \left| k_{f,L} \cdot \frac{\Delta V_{Ed} \cdot S_y}{I_y \cdot t_w} \right| + \left| k_{f,G} \cdot \left(\frac{\Delta N_{Ed}}{A} + \frac{\Delta M_{y,Ed}}{I_y} \cdot z_d \right) \right| \quad (\text{A.31})$$

where

ΔV_{Ed} load range of the vertical shear force applied to the composite member

$\Delta M_{y,Ed}$ range of the bending moment applied to the composite member

ΔN_{Ed} load range of the normal force applied to the composite member

I_y second moment of area of the effective composite section, neglecting concrete in tension

S_y first moment of area of the excluded area of the effective section at the steel dowel base

A cross-sectional area of the effective composite section, neglecting concrete in tension (see prEN 1994-1-1:2024, 7.4.2.2 and 7.4.2.3)

z_d distance from the base of the steel connector to the neutral axis of the composite section neglecting concrete in tension

$k_{f,L}$ stress concentration factor for local effects (longitudinal shear)

$k_{f,L,PZ} = 8,6$ for PZ geometry

$k_{f,L,CL} = 7,3$ for MCL geometry

$k_{f,G}$ stress concentration factor for global effects

$k_{f,G,PZ} = 1,9$ for PZ geometry

$k_{f,G,CL} = 1,5$ for MCL geometry

Rys. 9 Fragment obecnie przygotowywanych wytycznych projektowych dla łączników typu *composite dowels*, [20] prCEN/TS 1994-1-102:2024

Po doktoracie wspólnie z W. Lorencem widząc potencjał rozwoju w nowej technologii przygotowaliśmy nowe stanowisko pod przyszłe badania (które wspólnie planowaliśmy, a które ze względu na gabaryty planowanych do badania belek nie były możliwe do wykonania na ówczesnej infrastrukturze badawczej Instytutu):

- [21] **M. Kożuch**, W. Lorenc, S. Rowiński, Nowe stanowisko do badań niszczących w Instytucie Budownictwa Politechniki Wrocławskiej. *Materiały Budowlane*. 2013, nr 3, s. 64-65.

Celem pogłębienia wiedzy o mechanizmach zniszczenia łączników MCL podjęliśmy wspólnie z W. Lorencem badania mające na celu wyznaczenie wpływu grubości środnika stalowego i zbrojenia części betonowej na nośność zespolenia. Wstępem do rozważań na ten temat był projekt finansowany z Funduszu Węgla i Stali pod akronimem ELEM:

- [22] M. Feldmann, F. Möller, S. Möller, P. Collin, R. Hällmark, O. Kerokoski, **M. Kożuch**, W. Lorenc, S. Rowiński, P. Collin, R. Hällmark, M. Nilsson, L. Åström, B. Norlin, G. Seidl, T. Hehne, O. Hoyer, M. Stambuk, T. Harju, Composite bridges with prefabricated decks. 2013. RFSR-CT-2008-00039 ELEM, Final report.

W ramach tego projektu opracowywane były technologie prefabrykacji pomostów mostowych, ale też wykonywane były badania łączników typu *composite dowels* na potrzeby ich stosowania w połączeniach ścinanych. Ponieważ głównym punktem odniesienia były wówczas Niemcy, a głównym partnerem był Niemiec (G. Seidl), wspólnie z nim opublikowaliśmy wyniki badań i uzasadnienie modelu łącznika MCL przyjętego w moim doktoracie:

- [23] W. Lorenc, **M. Kożuch**, G. Seidl, Zur Grenztragfähigkeit von Verbunddübeln mit Klothoidenform. *Stahlbau*. 2013, Jg. 82, H. 3, s. 196-207.

Fachthemen

Wojciech Lorenc
Maciej Kożuch
Günter Seidl

DOI: 10.1002/stab.201310030

Zur Grenztragfähigkeit von Verbunddübeln mit Klothoidenform

Verbunddübel sind ein robustes und wirtschaftliches Tragelement zur Einleitung von Schubkräften zwischen Beton in Stahl, dessen Tragverhalten in der letzten Zeit Thema verschiedener Forschungsprojekte ist. Ausgehend vom Stand der Technik werden Untersuchungen zur plastischen Tragfähigkeit des Stahldübeln erläutert.

$$\begin{aligned}\sigma &= \sigma_L + \sigma_G = k_{f,L} \frac{V_y}{t_w} + k_{f,G} (\sigma_M + \sigma_N) \\ &= k_{f,L} \frac{V_z \cdot S_y}{I_y \cdot t_w} + k_{f,G} \left(\frac{M_y}{I_y} z_D + \frac{N}{A} \right)\end{aligned}\quad (1)$$

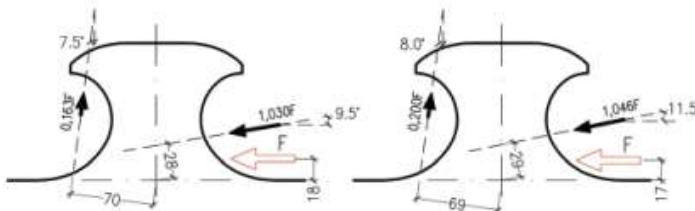


Bild 16. Resultierende Kräfte am Stahldübel unter Schubbelastung aufgeteilt in eine belastende Wirkung an der kraftzugewandten Seite und eine stützende Wirkung am Stahldübeln für den Gebrauchszustand (links) und den Grenzfall der Tragfähigkeit (rechts)

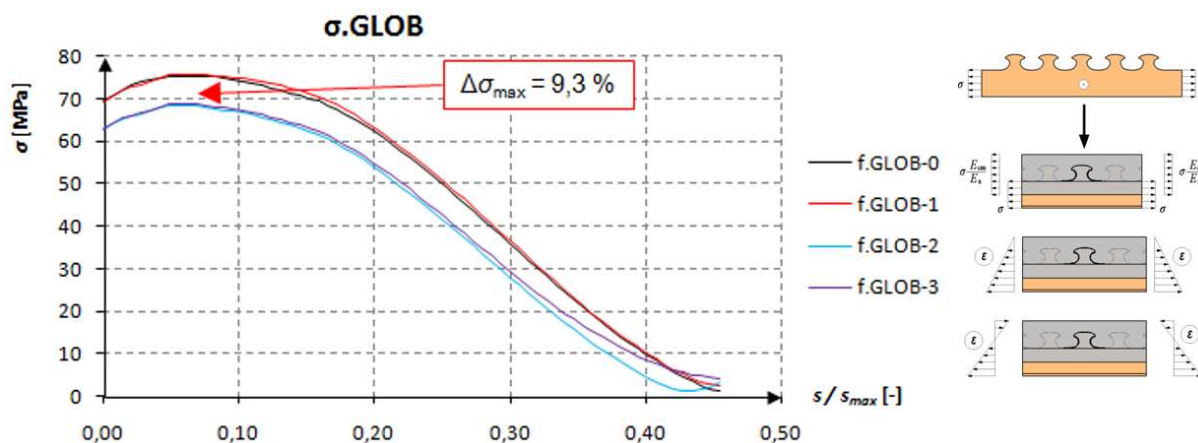
Fig. 16. Resulting forces acting on the steel dowel partitioned into a loaded component at the front edge and a supporting component at the dowels back for service state (left) and ultimate limit state (right)

Rys. 10 Fragment publikacji [23] opisującej część prac związanych z nośnością graniczną łączników MCL

Odnosząc się do wyników S. Rowińskiego i kolegów z Wydziału Mechanicznego Politechniki Wrocławskiej budowałem coraz bardziej jasny obraz pracy łącznika pod obciążeniami cyklicznymi:

- [24] S. Rowiński, W. Lorenc, **M. Kożuch**, Study on fatigue cracks in steel - concrete shear connectors composite dowels MCL. Key Engineering Materials. 2014, vol. 598, s. 207-212.

Wykonałem też dodatkową weryfikację wyznaczonych wcześniej współczynników koncentracji naprężeń, analizując wpływ na wartości naprężeń w łączniku dodatkowego parametru w postaci nierównomiernego rozkładu naprężeń po wysokości belki.



Rys. 11 Rozkłady naprężeń na krawędzi łącznika MCL w zależności od rozkładu naprężeń po wysokości belki

Wykazałem, że pominięcie efektu blokowania górnej części łącznika w ściskanym (lub mniej rozciągającym) betonie jest konserwatywne, a skrajnym przypadkiem jest czyste rozciąganie przekroju, dla którego zostały wyznaczone wcześniej współczynniki koncentracji naprężeń, i dla którego naprężenia w łączniku są ekstremalne. Uzasadniłem, że pominięcie ww. efektu daje wyniki po stronie bezpiecznej i pozwala wykluczyć z analizy dodatkową zmienną w postaci opisu rozkładu naprężeń (czy odkształceń) po wysokości przekroju poprzecznego belki.

Mając obraz pracy łącznika MCL wspólnie z W. Lorencem i S. Rowińskim postanowiliśmy jeszcze raz przeanalizować wyniki z projektu *Precobeam*, co doprowadziło nas do nowych konkluzji, a przede wszystkim wskazało, że również łączniki PZ wykazują pewien rodzaj utwierdzenia w betonie. Nasze publikacje w JCSR stanowią jak dotąd chyba najdokładniejszy opis zachowania się stalowych łączników PZ (kształt puzzla) w betonie i są często cytowane:

- [25] W. Lorenc, **M. Koźuch**, S. Rowiński, The behaviour of puzzle-shaped composite dowels. Pt. 1, Experimental study. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014, vol. 101, s. 482-499.
- [26] W. Lorenc, **M. Koźuch**, S. Rowiński, The behaviour of puzzle-shaped composite dowels. Pt. 2, Theoretical investigations. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014, vol. 101, s. 500-518.

Cytowania ww. prac wg Web of Science to 71 razy dla [25] oraz 45 razy dla [26], wg Scopus to 81 razy dla [25] i 52 razy dla [26], a wg ResearchGate 84 razy dla [25] i 53 razy dla [26] (stan na 13.05.2024). Podkreśla się, że celem tych publikacji nie była tylko analiza łącznika PZ, ale wykazanie podobieństwa pracy tego łącznika do pracy łącznika MCL i tym samym wskazanie na korzyści płynące ze stosowania MCL w stosunku do PZ. Kolejnym celem było pokazanie warsztatu pracy tj. jak modelować łączniki za pomocą MES. Wykorzystano w tym celu niepublikowane wcześniej wyniki bardzo starannie przeprowadzonych prób POST z projektu *Precobeam*. W połączeniu z wynikami z projektu *ELEM* (łączniki o kształcie MCL) uzyskuje się cenną i szeroką wiedzę o zachowaniu się łączników (o różnych kształtach) w betonie. Kolejnym istotnym aspektem tych publikacji jest wykazanie potencjalnego konserwatywności podejścia do projektowania części stalowej łączników typu *composite dowels*: mianowicie stosuje

się do wyznaczania nośności granicznej współczynnik częściowy 1.25 w połączeniu z wytrzymałością stali przyjętą na poziomie granicy plastyczności f_y (a nie wytrzymałości na rozciąganie f_u), co jest podejściem odmiennym w stosunku do stosowanych standardowo w EC3 i EC4 (np. dla określenia nośności sworzni z główką, przekrojów netto itp.).

Następnie wspólnie z S. Rowińskim podsumowaliśmy wyniki naszych prac na zaproszenie Steel Construction w wydaniu poświęconym połączeniu *composite dowels*:

- [27] **M. Kozuch**, S. Rowiński, Elastic behaviour of the steel part of a shear connection with MCL composite dowels : design basis for serviceability and fatigue limit states. Steel Construction. 2016, vol. 9, nr 2, s. 107-114.

W tym czasie równolegle zajmowałem się już innymi tematami naukowymi i inżynierskimi, a wyniki swoich prac opublikowałem w dwóch artykułach, z czego szczególnie drugi uważam za bardzo istotny, ponieważ pojawił się on w odpowiedzi na nowe wyniki badań doweli z betonem UHPC, które pojawiły się w Niemczech.

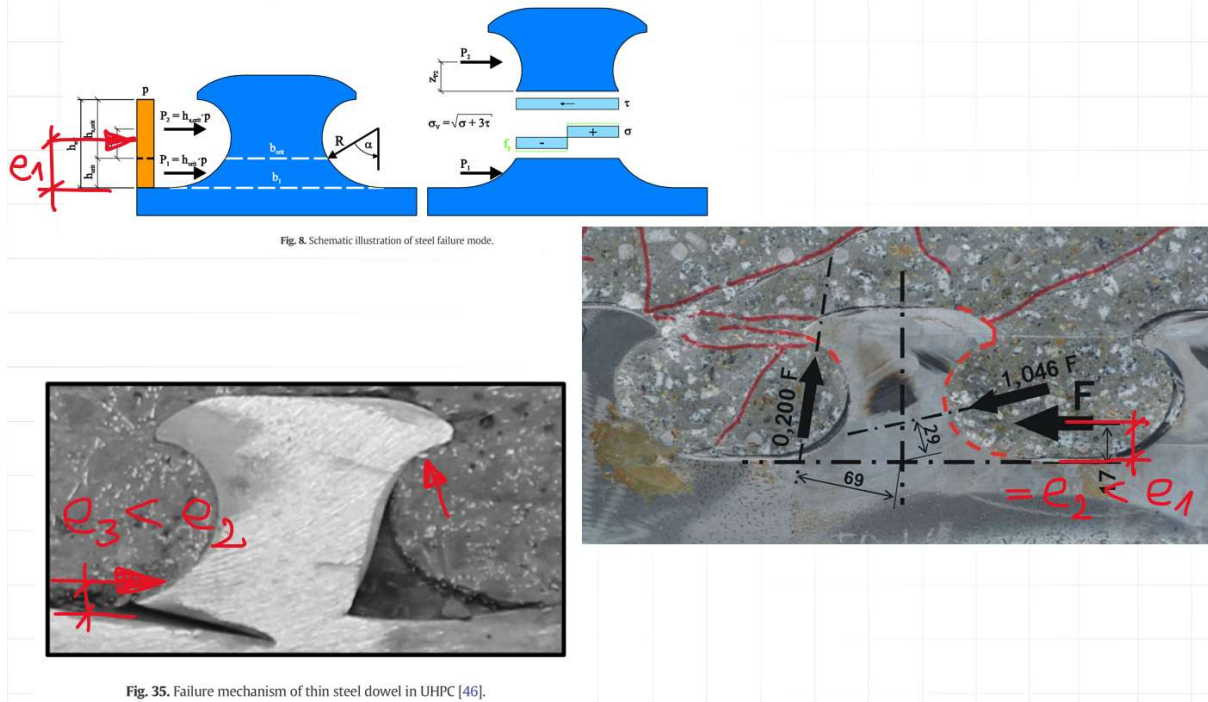
- [28] **M. Kozuch**, W. Lorenc, Stress concentration factors of shear connection by composite dowels with MCL shape. Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2019, vol. 19, nr 1, s. 32-46.
- [29] **M. Kozuch**, W. Lorenc, The behaviour of clothoid-shaped composite dowels: experimental and numerical investigations. Journal of Constructional Steel Research. 2020, vol. 167, art. 105962, s. 1-18.

Część naukowego środowiska niemieckiego (a konkretnie zespół z RWTH Aachen) nie odniosła się do moich wyników podważających zasadność przyjmowania modelu łącznika jako wspornika. Tymczasem wyniki badań T. Lechnera [30], [31], który badał w tym czasie *dowele* w betonie UHPC wykazały, że nośność części stalowej łącznika jest znacznie za duża (w stosunku do prognozowanej wg opracowanych w Niemczech modeli mechanicznych), co wzbudziło zainteresowanie w środowisku naukowców niemieckich.

- [30] Lechner T., Zur Anwendung von Verbunddübeln in schlanken Verbundträgern aus ultrahochfestem Beton. Dissertation, Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt der Technischen Universität München, 2017,
- [31] Lechner, T., Seidl, G., Fischer, O., Lightweight Composite Beams Utilizing UHPC and Composite Dowels. Eleventh High Performance Concrete (11th HPC) & Second Concrete Innovation Conference (2nd CIC), 04.2017.

Zostaliśmy (jako zespół uczestniczący od samego początku w pracach nad łącznikami *composite dowels* i dodatkowo jako zespół odpowiedzialny za opracowanie wytycznych dla obliczania części stalowej połączenia) poproszeni (przez T. Lechnera z TU München) o komentarz w tej sprawie i mój model dawał jednoznaczne wyjaśnienie. T. Lechner w pracy [30] powołuje się na moje badania i opracowany przeze mnie model mechaniczny. Aby wyjaśnić dużą nośność części stalowej, należy przyjąć, że w modelu mechanicznym łącznika są dwie siły: jedna działająca z przodu łącznika wynikająca wprost z kierunku przyłożonego obciążenia, druga działająca na tylny górny fragment łącznika, o składowej poziomej przeciwnie skierowanej,

odginająca łącznik i powodująca jego utwierdzenie w betonie (a nie jedna siła działająca z przodu łącznika jak w modelu Aachen). Fakt, że beton UHPC nie ulega pulweryzacji w strefie docisku przed zębem tłumaczy w całości zjawisko dużej nośności części stalowej, jeżeli zastosuje się mój model; przednia siła „odkręca” w dół, a wypadkowa znajduje się bardzo nisko (co jednocześnie wskazuje na bardzo duży potencjał tego zespolenia w UHPC).



Rys. 12 Porównanie modelu mechanicznego opracowanego przez zespół niemiecki [16] (na górze) na tle opracowanego przeze mnie (po prawej) i potencjału łączników typu CD w betonie UHPC [30] (na dole), dla którego wypadkowa sił ścinających znajduje się jeszcze bliżej podstawy łącznika

Tym samym wykorzystałem niemieckie wyniki do wykazania niepoprawności niemieckiego modelu i uważam, że artykuły [29] i [30] zamykają na chwilę obecną temat nośności łącznika stalowego MCL w normalnym betonie. Artykuły te są w zasadzie podsumowaniem moich prac badawczych nad łącznikami MCL i odpowiedzią na niemiecki model proponowany przez Aachen (i zasadniczo obala ten model). W artykułach tych przedstawiłem też swoje prace związane z określeniem nośności granicznej łącznika, opisując wykonane badania eksperymentalne oraz numeryczne.

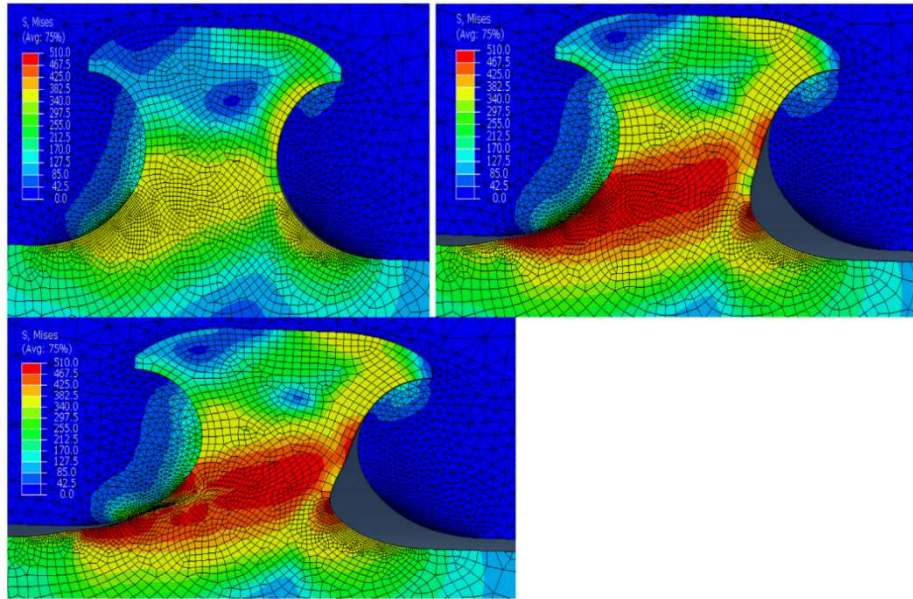


Fig. 26. Mises stress plots and deformations (scaled 3 \times) in steel dowel in consecutive stages of loading: 1.96 F, 2.73F and 2.60F, where F is force at which yield stress appears in first point in dowel.

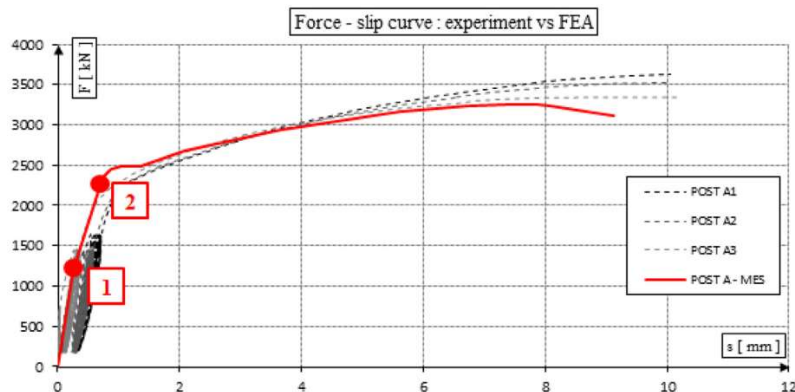


Fig. 28. Comparison of force-slip curves determined experimentally and obtained from FEA for POST series A. Point 1 – steel yielding in first point of dowel, Point 2 – steel yielding in entire dowel section.

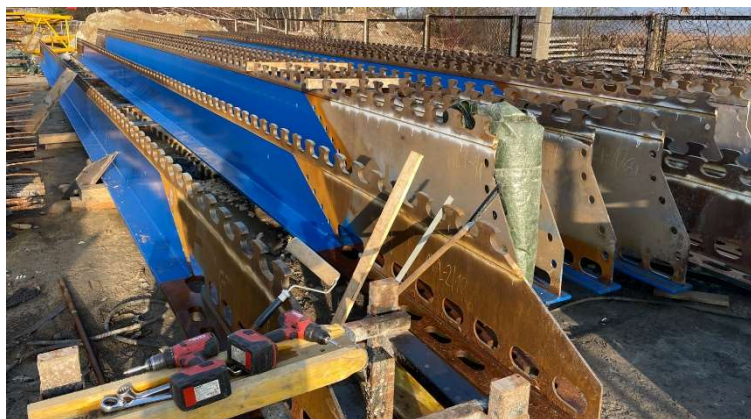
Rys. 13 Grafika przedstawiająca stan naprężeń w łączniku MCL w kolejnych etapach jego obciążania oraz krzywa siła – poślizg otrzymana w badaniach numerycznych i doświadczalnych: wycinek z pracy [29]

Udział W. Lorenc w ww. artykułach, w którym przedstawione są wyniki badań związanych z nośnością sprężystą i graniczną łączników MCL jest „na zasadzie patrona prac”. Podsumowanie, jak przebiegały prace nad rozwojem stalowej części połączenia CD nazwanej MCL, przedstawiłem wraz z W. Lorencem w:

- [32] **M. Kożuch**, W. Lorenc, Development of the modified clothoidal (MCL) shape of composite dowels against the background of fatigue and technological issues. *Studia Geotechnica et Mechanica* (obecnie w druku).

Natomiast na ile istotna okazała się w znaczeniu praktycznym moja praca, pokazuje przykład budowy nowych mostów hybrydowych w ciągu drogi S3 na odcinku Troszyn – Świnoujście (opisane dalej, wnioskodawca wykonywał część obliczeń statyczno – wytrzymałościowych oraz pełnił funkcję sprawdzającego w projektach 5 mostów hybrydowych na tym odcinku

drogi): po wprowadzeniu *Eurokodów* do projektowania mostów w Polsce krytycznym sprawdzeniem (tj. decydującym o doborze grubości doweli) stalowej części zespolenia okazały się warunki żywotności zmęczeniowej (FLS, z zastosowaniem moich wartości współczynników koncentracji naprężeń). Powoduje to w praktyce konieczność stosowania w mostach drogowych doweli stalowych o grubości około 30 mm i tym samym projektowanie dźwigarów z kształtowników walcowanych (warunkowane racjonalnymi proporcjami pasa dolnego i środka) staje się nieracjonalne bez dodatkowego spawania tzw. grzebienia (dobór kształtownika walcowanego ze względu na wymaganą grubość środka rzędu 30 mm powodowałby nieracjonalne zużycie materiału z uwagi na zbyt gruby środek poniżej łączników oraz zbyt grube pasy dźwigara). To spowodowało konieczność spawania tzw. grzebienia, czyli odcinka blachy o grubości rzędu 30 mm z dowelami do cieńszego środka poniżej, a w konsekwencji *de facto* stosowanie blachownic, a nie belek walcowanych (na obiektach budowanych w ciągu drogi S3). **Takie rozwiązanie zastosowano po raz pierwszy na świecie:**



Rys. 14 Część stalowa dźwigarów hybrydowych na budowie drogi S3 (odcinek Troszyn – Świnoujście)



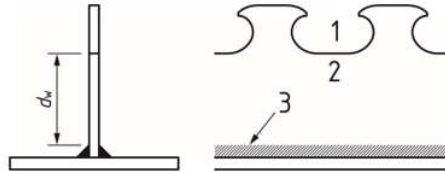
Rys. 15 Przygotowane "grzebienie" o grubości rzędu 30 mm do dospawania do cieńszych środków dźwigarów hybrydowych. Budowa drogi S3 (odcinek Troszyn – Świnoujście)

To w konsekwencji wymusiło rozwiązanie nowego problemu naukowego tzn. jak nierównomierne oddziaływanie łączników działa na spoiny łączące grzebię z dowelą ze środkiem dźwigara znajdującym się poniżej (pod kątem nośności statycznej spoin i ich zmęczenia). Temat ten rozwiązywałem razem z firmą ArcelorMittal i W. Lorencem:

- [33] F. Profico, R. Zanon, W. Lorenc, **M. Kożuch**, Influence of local effects of composite dowels shear connection on the design of longitudinal weld parallel to them. Wyzwania współczesnego mostownictwa: Seminarium Naukowo-Techniczne Wrocławskie Dni Mostowe, Wrocław, 2022. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, s. 221-228.

Odzwierciedlenie tych prac stanowią klauzule prCEN/TS 1994-1-102:2024 [20]:

(9) For the design of a continuous symmetrical fillet weld connecting the composite dowel strip to a steel flange, the effects of local stresses due to the composite dowels may be neglected if the distance d_w between the dowel base to the tip of the weld is greater than $1,2 e_x$ (see Figure A.9).



Key

- 1 concrete
2 steel
3 weld

Figure A.9 — Dowel strip welded on a steel flange

(10) For the design of a continuous symmetrical fillet weld connecting the composite dowel strip to a steel flange, the longitudinal shear stress parallel to the weld axis $\tau_{//}$ and the normal stress perpendicular to the weld axis σ_{\perp} according to FprEN 1993-1-8:2023, 6.5.3.2 should be considered to be affected by effects of local stresses if the distance d_w between the dowel base to the tip of the weld is smaller than $1,2 e_x$ (see Figure A.9).

(11) In the conditions described by (9), the maximum longitudinal shear stress parallel to the weld axis $\tau_{//,max}$ and the maximum absolute value of the normal stress perpendicular to the weld axis $\sigma_{\perp,max}$ should be calculated based on the longitudinal shear flow v_l in the shear connection.

In the conditions described by (10), the maximum absolute value $\tau_{//,max}$ of the longitudinal shear stress $\tau_{//}$ should be calculated as follows in the range d_w between $0,15 e_x$ and $1,20 e_x$:

$$\tau_{//,max} = \left(1 + 0,25 \left(1,2 - \frac{d_w}{e_x} \right) \right) \frac{v_l}{2a} \quad (\text{A.32})$$

where a is the equivalent throat thickness of the weld according to EN 1993-1-8. Under fatigue loading, the maximum variation of shear stress $\Delta\tau_{//,max}$ should be calculated with Formula (A.32) by considering the variation of the longitudinal shear flow Δv_l in place of v_l .

The perpendicular stress σ_{\perp} has a non-uniform distribution along the weld axis with values varying from tension to compression. The absolute maximum value of the perpendicular stress σ_{\perp} should be calculated as follows in the range d_w between $0,15 e_x$ and $1,20 e_x$:

$$\sigma_{\perp,max} = \left[-1,62 \left(\frac{d_w}{e_x} \right)^3 + 4,92 \left(\frac{d_w}{e_x} \right)^2 - 5,10 \left(\frac{d_w}{e_x} \right) + 1,83 \right] \frac{v_l}{2a} \quad (\text{A.33})$$

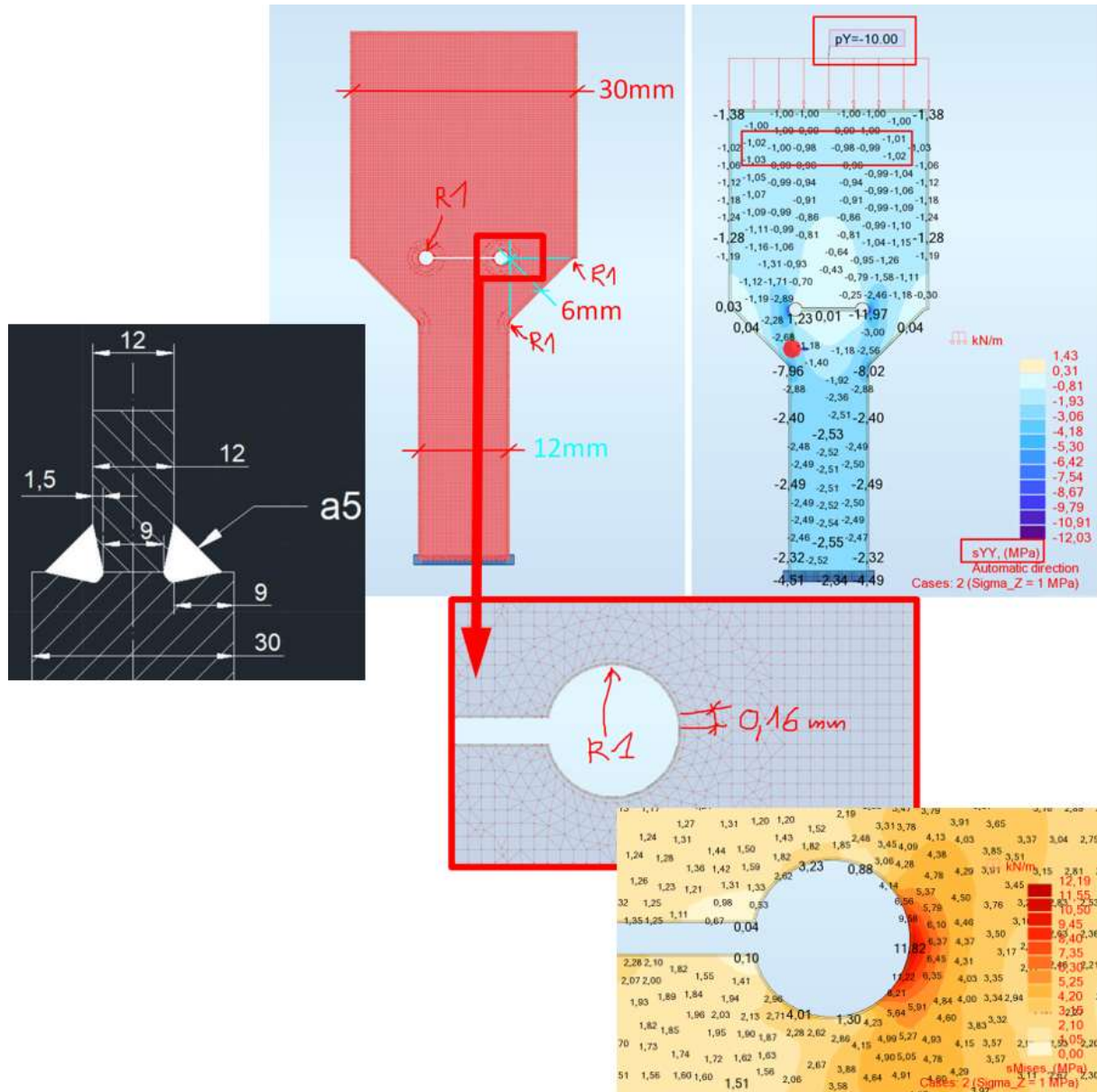
where a is the equivalent throat thickness of the weld according to EN 1993-1-8. Under fatigue loading, the maximum variation of perpendicular stress σ_{\perp} should be calculated with the same Formula by considering the variation of the longitudinal shear flow Δv_l in place of v_l .

Rys. 16 Fragment obecnie przygotowywanych wytycznych projektowych dla łączników typu *composite dowels* przy spawaniu grzebienia do cieńszego średnika, prCEN/TS 1994-1-102:2024 [20]

Optymalizacja spoin łączących grzebień doweli z cieńszym średnikiem zlokalizowanym poniżej była też przedmiotem dokumentacji wykonanej na potrzeby przemysłu:

- [34] **M. Kożuch**, W. Lorenc, Analiza możliwości modyfikacji połączenia blachy z łącznikami MCL (gr. 30 mm) ze środnikiem stalowym belek CB (gr. 12 mm) pod kątem zastosowania spoin pachwinowych. Pontes Sp. z o.o., 2022.

W ramach ww. dokumentacji wykonane zostały obszerne studia literaturowe, a następnie analizy statyczne – wytrzymałościowe, też przy obliczeniach spoin metodą hotspot.



Rys. 17 Analizy spoin metodą hotspot wykonane w ramach dokumentacji [34]

Powyższe pokazuje, jak temat łączników ewoluuje wraz z rozwojem technologii, natomiast sama kwestia współczynników koncentracji naprężeń, nośności granicznej i modelu pracy łącznika w betonie normalnym jest raczej tematem zamkniętym. Być może ze względu na korektę krzywych zmęczeniowych (w przyszłym Eurokodzie) i możliwość komercyjnego stosowania UHPC w przyszłości zostanie podjęta próba wykazania, że w betonie UHPC zachowanie się łącznika jest bardziej korzystne (chodzi tu głównie o współczynniki koncentracji naprężeń przekładające się bezpośrednio na wytrzymałość zmęczeniową łącznika).

Jako cykl publikacji podsumowujący ww. działania przedstawiam co następuje, przy czym najistotniejsze (z mojego punktu widzenia) publikacje przedstawiłem wytłuszczonym drukiem. Podpisy współautorów potwierdzające mój wkład w ich opracowanie znajdują się w zał. 5.

[2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [32], [33].

Poz.	Tytuł opracowania	Autorzy	Opis	Wkład wnioskodawcy
[2]	Metody oceny wytrzymałości łączników w innowacyjnym zespoleniu belek stalowo – betonowych. <i>V Sympozjon: Kompozyty, konstrukcje warstwowe</i>	W. Lorenc, E. Kubica, M. Kożuch	Referat konferencyjny przedstawiający ogólnie zespolenie typu Composite dowels, pierwsze metody projektowej oceny wytrzymałości w odniesieniu do ULS, SLS i FLS oraz badania doświadczalne wykorzystywane w celu potwierdzenia wytycznych projektowych	Opis metod doświadczalnej weryfikacji nośności części stalowej połączenia
[3]	Testing procedures in evaluation of resistance of innovative shear connection with composite dowels <i>Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2010, vol. 10, nr 3</i>	W. Lorenc, E. Kubica, M. Kożuch	Opis metod doświadczalnych badania wytrzymałości zespolenia typu Composite dowels oraz sposoby interpretacji tych wyników na tle dotychczasowych badań konstrukcji zespolonych, również w odniesieniu do badań cyklicznych	Opracowanie koncepcji montażu czujników tensometrycznych na dowelach stalowych, wstępna analiza pomiarów tensometrycznych na potrzeby pokazania sposobu ich interpretacji
[4]	Koncepcja projektowania i szacowania trwałości zmęczeniowej belek zespolonych z połączeniem ścinanym typu Composite Dowels <i>Górnictwo odkrywkowe. 2010, R. 51, nr 4</i>	P. Harnatkiewicz, A. Kopczyński, W. Lorenc, M. Kożuch	Prezentacja koncepcji nośności sprężystej (KNS) łącznika stalowego i ideowa prezentacja interakcyjnej obwiedni nośności łącznika stalowego w stanie sprężystym. Prezentacja modelu belkowego belki precobeam, założeń teoretycznych do analizy i wyników numerycznej analizy zmęczeniowej	Opis koncepcji nośności sprężystej oraz zakresu i sposobu jej stosowania w SLS i FLS (na tym etapie dla łączników MCL KNS nie była potwierdzona, ani nie było wyznaczonych jeszcze wartości współczynników koncentracji naprężeń)
[5]	Nośność zmęczeniowa ciągłych łączników otwartych <i>Raporty Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej. 2011, seria SPR nr 19</i>	W. Lorenc, E. Rusiński, E. Kubica, K. Rykaluk, A. Kopczyński, P. Harnatkiewicz, M. Kożuch, S. Rowiński	Raport końcowy z zrealizowanego wspólnie z Wydziałem Mechanicznym PWr. projektu MNiSW dokumentujący wykonane badania doświadczalne i numeryczne belek zespolonych	Współautor projektu badań, wykonawca obliczeń statyczno-wytrzymałościowych belek na potrzeby projektu badań, udział w prowadzonych badaniach, opracowanie

			poddanych obciążeniom zmęczeniowym.	oraz analiza wyników badań doświadczalnych
[6]	Research on fatigue cracks in composite dowels shear connection <i>Engineering Failure Analysis. 2011, vol. 18, nr 5</i>	P. Harnatkiewicz, A. Kopczyński, M. Kożuch, W. Lorenc, S. Rowiński	Opis belek precobeam wraz z podaniem sposobu ich wytwarzania i zwrócenie uwagi na wpływ technologii cięcia na żywotność zmęczeniową doweli, opis badań cyklicznych przeprowadzonych na belkach z łącznikami PZ, przedstawienie wykonanych analiz numerycznych służących do szacowania żywotności zmęczeniowej	Opis zmęczeniowych badań doświadczalnych oraz kwestii technologicznych dotyczących wytwarzania części stalowej, a mających wpływ na wytrzymałość zmęczeniową belek (cięcie plazmą vs tlenem, przerwy robocze w cięciu, naprężenia własne)
[7]	Planowanie badań doświadczalnych konstrukcji zespolonych z ciągłymi łącznikami otwartymi <i>Interdyscyplinarność badań naukowych 2011</i>	S. Rowiński, M. Kożuch	Referat konferencyjny dotyczący rodzajów badań wykonywanych dla określenia nośności granicznej, sprężystej i zmęczeniowej belek z połączeniem composite dowels	Część referatu dot. badań statycznych (S. Rowiński opisał badania zmęczeniowe)
[8]	Study on fatigue cracks in steel-concrete shear connection with composite dowels <i>Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2011, vol. 11, nr 4</i>	W. Dudziński, G. Pękalski, P. Harnatkiewicz, A. Kopczyński, W. Lorenc, M. Kożuch, S. Rowiński	Artykuł zawiera opis badania metalograficznego pęknięcia zmęczeniowego jednej z badanych belek z łącznikami PZ, celem pokazania mechanizmu rozwoju pęknięcia, a także opis planowanych do wykonania kolejnych badań	Koncepcja badań statycznych z rozmieszczeniem czujników tensometrycznych do pomiaru odkształceń celem potwierdzenia wyników badań numerycznych (walidacja KNS)
[9]	Model zniszczenia łącznika w zespoleniu typu composite dowels <i>Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska. 2012, z. 59, nr 3/II</i>	M. Kożuch, S. Rowiński, W. Lorenc, E. Kubica	Wstępny opis wykonanych w 2011-2012 badań statycznych i zmęczeniowych belek z łącznikami MCL, wstępne wyniki badań tych belek oraz prezentacja modeli wycinkowych służących do określenia współczynników koncentracji naprężeń w KNS	Opis belek i wyników badań statycznych, przedstawienie zbudowanych przeze mnie modeli numerycznych służących do określenia współczynników koncentracji naprężeń w KNS, wstępna walidacja tych modeli na podstawie pomiarów odkształceń w łącznikach
[10]	Analizy numeryczne a badania doświadczalne na przykładzie łączników typu MCL w konstrukcjach zespolonych	S. Rowiński, M. Kożuch	Referat konferencyjny dotyczący analiz numerycznych łącznika w połączeniu composite dowels wraz z przedstawieniem pierwszych wyników badań	Część referatu dot. badań statycznych, pokazanie walidacji modeli numerycznych na podstawie wyników badań doświadczalnych (S. Rowiński)

	<i>Interdyscyplinarność badań naukowych 2012</i>		doświadczalnych. Porównanie wyników numerycznych, doświadczalnych także na tle otrzymanych podczas badań cyklicznych pęknięć zmęczeniowych.	opisał badania zmęczeniowe)
[23]	Zur Grenztragfähigkeit von Verbunddübeln mit Klothoidenform <i>Stahlbau. 2013, Jg. 82, H. 3</i>	W. Lorenc, M. Kożuch, G. Seidl	Przedstawienie wybranych wyników badań doświadczalnych oraz numerycznych dot. określania nośności granicznej łącznika MCL na podstawie badań typu POST wykonanych m.in. w ramach projektu ELEM. Pobieźny opis wycinkowego modelu MES wykorzystanego do numerycznego określenia nośności granicznej łącznika, prezentacja modelu mechanicznego łącznika MCL, przedstawienie koncepcji nowego modelu MES umożliwiającego uwzględnienie jednoczesnego działania na łączniki naprężeń tzw. globalnych i lokalnych	Wnioskodawca przeprowadził badania elementów POST, wykonał opis i opracowanie wyników badań doświadczalnych, następnie zbudował wycinkowe modele z łącznikami MCL służące do analizy (w tym przypadku) nośności granicznej. Wnioskodawca przedstawił dodatkowo opracowany przez siebie model mechaniczny łącznika MCL
[24]	Study on fatigue cracks in steel - concrete shear connectors composite dowels MCL <i>Key Engineering Materials. 2014, vol. 598</i>	S. Rowiński, W. Lorenc, M. Kożuch	Opis łączników composite dowels, badań cyklicznych belek z łącznikami MCL wraz z wynikami i badaniami mikroskopowymi pęknięć zmęczeniowych	Współtwórca publikacji, udział w realizacji badań i przeprowadzonym wnioskowaniu (na tym etapie w zasadzie wszystkie badania belek były realizowane w zespole W. Lorenc, M. Kożuch, S. Rowiński)
[25]	The behaviour of puzzle-shaped composite dowels. Pt. 1, Experimental study <i>Journal of Constructional Steel Research. 2014, vol. 101</i>	W. Lorenc, M. Kożuch, S. Rowiński	Obszerne studia literaturowe dot. genezy określania nośności łączników stalowych, przedstawienie planu badań POST z projektu Precobeam (łączniki PZ), opis przebiegu badań, ich wyniki oraz interpretacja. Również opis zależności między nośnością i ciągliwością	Współtwórca projektu badań elementów typu POST, opracowanie wyników doświadczalnych

			połączenia a rozmiarem łączników	
[26]	<p>The behaviour of puzzle-shaped composite dowels. Pt. 2, Theoretical investigations</p> <p><i>Journal of Constructional Steel Research. 2014, vol. 101</i></p>	W. Lorenc, M. Koźuch, S. Rowiński	<p>Opis istniejących na tym etapie modeli mechanicznych łączników (łącznik PZ wciąż uznawany za pracujący wspornikowo), opis wycinkowego modelu numerycznego służącego do odwzorowania pracy łącznika PZ w MES, analiza modeli z różnymi ścieżkami materiałowymi i definicjami kontaktu, analiza wyników na tle badań doświadczalnych, propozycja modelu siła-poślizg dla łącznika PZ i opis zachowania się łącznika na każdym poziomie wyężenia, analiza naprężeń w łączniku prowadząca do wykazania, że łącznik PZ również pracuje jako utwierdzony w betonie (ale w mniejszym stopniu niż MCL)</p>	<p>Opis badań oraz przygotowanie części doświadczalnej do kalibracji modeli numerycznych, współautorstwo wniosków</p>
[27]	<p>Elastic behaviour of the steel part of a shear connection with MCL composite dowels: design basis for serviceability and fatigue limit states</p> <p><i>Steel Construction. 2016, vol. 9, nr 2</i></p>	M. Koźuch, S. Rowiński	<p>Artykuł przedstawiający ogólne podejście do określania naprężeń sprężystych w łączniku MCL na potrzeby analizy SLS i FLS oraz częściowe wyniki badań zmęczeniowych belek z łącznikami MCL pokazujące progresywny rozwój pęknięć zmęczeniowych.</p>	<p>Przedstawienie założeń KNS oraz analiz i częściowych wyników numerycznych służących do określenia współczynników koncentracji naprężeń dla łączników MCL.</p>
[28]	<p>Stress concentration factors of shear connection by composite dowels with MCL shape</p> <p><i>Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2019, vol. 19, nr 1</i></p>	M. Koźuch, W. Lorenc	<p>Przedstawiono założenia KNS, opisano precyzyjnie w jaki sposób wyznaczane są współczynniki koncentracji naprężeń w łączniku, opisano wycinkowe modele MES, przedstawiono wyniki wybranych analiz parametrycznych. Następnie</p>	<p>W artykule tym wnioskodawca przedstawił autorskie prace związane z wyznaczeniem obwiedni interakcyjnej nośności łącznika MCL dla dowolnego stanu jego obciążenia, rozpatrując stan naprężeń zarówno przed, jak i za łącznikiem. Obwiednie</p>

			<p>przedstawiono sposób przeprowadzenia obliczeń analitycznych wykonanych na potrzeby opracowania pełnych obwiedni interakcyjnej nośności łącznika MCL dla dowolnego stanu jego obciążenia, rozpatrując stan naprężeń zarówno przed, jak i za łącznikiem. Tym samym wyznaczono też współczynniki koncentracji naprężeń – zarówno na potrzeby ograniczenia naprężeń w SLS, jak i FLS, opisano badania doświadczalne potwierdzające otrzymane numerycznie wyniki.</p>	<p>te można sprowadzić do tzw. współczynników koncentracji naprężeń w łączniku, które obecnie wykorzystane są przy tworzeniu wytycznych CEN-TS na potrzeby sprawdzania wytrzymałości zmęczeniowej (naprężenia główne). Analogiczne podejście przedstawiłem dla naprężeń zredukowanych (mogących służyć do sprawdzeń warunków ograniczenia naprężeń w SLS). Modele numeryczne przedstawione w artykule oraz wszystkie analizy parametryczne były wykonane przez wnioskodawcę. Również badania, wykonane w zespole z W. Lorencem, były realizowane pod moim nadzorem, byłem też odpowiedzialny za opracowanie ich wyników.</p>
[29]	<p>The behaviour of clove-shaped composite dowels: experimental and numerical investigations</p> <p><i>Journal of Constructional Steel Research. 2020, vol. 167, art. 105962</i></p>	M. Koźuch, W. Lorenc	<p>Opis niepublikowanych wcześniej badań POST z łącznikami MCL wraz z podaniem szczegółowych wyników i ich interpretacją. Analiza nośności i ciągłości łącznika w zależności od jego grubości wraz z opisem możliwych mechanizmów zniszczenia. Opis wycinkowego modelu numerycznego służącego do oceny nośności granicznej łącznika oraz przedstawienie wyników analiz numerycznych w zależności od przyjętych modeli materiałowych, analiza wyników i ich walidacja badaniami doświadczalnymi, wyprowadzenie</p>	<p>Wnioskodawca jest współautorem projektu badań elementów POST służących do określania nośności granicznej łączników MCL. Wykonał opis i opracowanie wyników badań doświadczalnych, następnie zbudował wycinkowe modele z łącznikami MCL służące do analizy (w tym przypadku) nośności granicznej (nieliniowości materiałowe, wyznaczenie ścieżki siła – poślizg łącznika aż do jego zniszczenia), a tym samym potwierdził za pomocą MES zaproponowany wzór do określania nośności granicznej</p>

			wzoru na nośność graniczną łącznika MCL, dokładny opis modelu mechanicznego oraz jego genezy w odniesieniu do modeli niemieckich, dowód na poprawność przyjętego modelu w odniesieniu też do wyników badań zmęczeniowych	z uwagi na część stalową zespolenia (przy tym określił wartość liczbową współczynnika nośności granicznej przyjmowanego w tym wzorze). Wnioskodawca przedstawił dodatkowo opracowany przez siebie model mechaniczny łącznika MCL udowadniając, że na łącznik działają 2 siły (z przodu oraz z tyłu), a przyjmowane często przez Niemców modele wspornikowe łącznika są niepoprawne
[32]	<p>Development of the modified clothoidal (MCL) shape of composite dowels against the background of fatigue and technological issues</p> <p><i>Studia Geotechnica et Mechanica (obecnie w druku)</i></p>	M. Kożuch, W. Lorenc	W artykule przedstawiono przebieg prac prowadzących do powstania i wdrożenia łączników zespalających typu MCL, od początku projektu Precobeam, aż do chwili obecnej (opracowanie zasad projektowych CEN-TS). Jest to publikacja podsumowująca „historię” łącznika na tle uzyskiwanych wyników badań i podejmowanych kolejno decyzji dot. jego rozwoju, od badań typu POST, NPOT, badań belek, rozwoju kształtu: od PZ przez CL aż do MCL, modyfikacji jego geometrii i dopuszczalnych odchyień od geometrii nominalnej, aż do wdrożeń w przemyśle.	Współautor treści publikacji
[33]	<p>Influence of local effects of composite dowels shear connection on the design of longitudinal weld parallel to them</p> <p><i>XXVIII Congresso C.T.A., Francavilla al Mare (CH), 2022.</i></p>	F. Profico, R. Zanon, W. Lorenc, M. Kożuch	Przedstawiono wyniki obliczeń analitycznych i numerycznych dotyczących stanu naprężeń w środku pod linią łączników, co ma szczególne znaczenie w sytuacji, w której listwa z łącznikami jest spawana spoinami	Przygotowanie wyników numerycznych dot. oddziaływania łączników na niżej znajdującą się część teownika stalowego. Wniesienie doświadczeń zdobytych przy optymalizacji spoin pachwinowych łączących

			<p>pachwinowymi do półek teownika (lub do środka teownika, jeśli ten jest cieńszy niż „grzebień” łączników). Zaprezentowano sposób / wyciągnięto wnioski dot. poprawnego projektowania spoin pachwinowych łączących „grzebień” z częścią teownika stalowego pod „grzebieniem”.</p>	<p>„grzebień doweli” z cieńszym średnicą teownika (takie rozwiązanie wnioskodawca optymalizował w ramach projektowania belek hybrydowych w ciągu drogi S3)</p>
--	--	--	--	--

4.2 Osiągnięcie nr 2

Tytuł osiągnięcia: Opracowanie metodyki wykonywania analizy statycznej dźwigarów hybrydowych stalowo-betonowych z wykorzystaniem modeli MES

- **związane cyklem powiązanych tematycznie artykułów naukowych, zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2b ustawy**

Drugim obszarem moich działań stały się zagadnienia dotyczące kwestii modelowania i metodyki wykonywania analizy statycznej nowego typu przekrojów zespolonych stalowo-betonowych (obecnie nazwanych hybrydowymi) i belek powstałych z ich zastosowaniem. Było to naturalną konsekwencją wdrożenia zespolenia MCL do projektowania w Polsce obiektów mostowych. Po wybudowaniu mostu „Wierna Rzeka” w 2010 roku:

- [35] G. Bukała, A. Giergowicz, T. Kołakowski, W. Lorenc, Przebudowa mostu kolejowego z zastosowaniem przęseł VFT-WIB®. Inżynieria i Budownictwo. 2011, nr 4, s. 187-190.

stało się jasnym, że mamy do czynienia z zupełnie nowym rodzajem konstrukcji zespolonych, których do tej pory nie tworzono i których zasad projektowania nie obejmowała żadna norma.

Zdobywaliśmy wtedy doświadczenie, ponieważ konstrukcje, które powstawały były w inżynierii czymś zupełnie nowym:

- [36] G. Seidl, W. Lorenc, **M. Kożuch**, S. Rowiński, VFT-RAIL: nowa technologia budowy zespolonych przęseł mostów kolejowych na przykładzie przebudowy mostu Simmerbach w Niemczech. Mosty (Katowice). 2013, nr 2, s. 48-54.
- [37] **M. Kożuch**, T. Kołakowski, W. Lorenc, E. Petzek, S. Rowiński, G. Seidl, Problem definicji przekroju zespolonego stalowo-betonowego na tle stosowanych obecnie w mostownictwie rozwiązań konstrukcyjnych. Obiekty mostowe w infrastrukturze

miejskiej. Wrocławskie Dni Mostowe. Wrocław, 2013. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, s. 325-331.

Opracowane przez nas wytyczne nie dawały jednak odpowiedzi na wiele pytań, a przede wszystkim jak wymiarować nowe przekroje stosując dotychczasowe metody opracowane w ramach projektów *Preco-beam* [1] i *Preco+* [11]. Po tym jak W. Lorenc zdefiniował problem przenoszenia ścinania poprzecznego w swoim krótkim artykule po wybudowaniu mostów w ciągu drogi S7, wspólnie szukaliśmy odpowiedzi na pytanie, dotyczące sposobów wymiarowania nowego (uogólnionego) typu przekroju stalowo-betonowego mając pełną świadomość, że kwestia przenoszenia siły poprzecznej jest tu zagadnieniem fundamentalnym, ale następnym w kolejności będzie pytanie o sposób, w jaki wykonywać należy analizę globalną nowego typu mostów (z uwzględnieniem i tego faktu, że następuje ciągły rozwój metod obliczeniowych, w szczególności MES).

[38] W. Lorenc, Przenoszenie siły poprzecznej a definicja konstrukcji zespolonej, *Mosty*, 2011/6, s. 49.

Przenoszenie siły poprzecznej a definicja konstrukcji zespolonej

a definicja konstrukcji zespolonej

Niniejszy komentarz stanowi uzupełnienie trzech części artykułu, które opublikowane zostały w 4 i 5 numerze magazynu „Mosty”. W aktualnym numerze publikujemy trzecią część tego artykułu, a komentarz W. Lorenca stanowi podsumowanie tematu realizacji przejścia ekologicznego z dźwigarów VFT-WIB nad drogą S7.

Pismienictwo
1. Kobiłkowski T., Kozicki W., Lorenc W., Raiberga J., Seifl G.: Prełożone dźwigary zespolone stalowo-betonowe typu VFT-WIB do budowy przejścia ekologicznego / kolejnych „Inżynieria i Budownictwo”, nr 2-8/2011, 319-322.
2. Berthelamy J., Lorenc W., Merzinger M., Raucher S., Seifl G.: Zum Tragverhalten von Verbundträgern, Teil 1: Tragverhalten unter zweiseitiger Belastung, Stahlbau 80 (2011), Heft 3.

W magazynie „Mosty” w numerach 4, 5 i 6/2011 na przykładzie obiektu PE4 nad drogą S7 przedstawiono proces realizacji konstrukcji z belek VFT-WIB. Formując aspekt technologiczny budowy (VFT), zwraca się uwagę na ciekawy przypadek przekroju zespolonego: mechanizm przenoszenia siły poprzecznej zmienia się tu wzdłuż dźwigara, wraz ze zmianą wysokości przekroju (zmienia grubość płyty betonowej). Upraszczając sprawę: w przekroju ścinanie przenosi stal, przy podporze beton zbrojony i powstaje pytanie, jak sytuacja wygląda w przekrojach pośrednich wzdłuż belki? Zagadnienie to zilustrowano poglądowo na rys. 1; jeżeli klasycznie w lewym przekroju przyjmiemy stalowy środnik jako element przenoszący siłę poprzeczną, a w przekroju prawym beton zbrojony strzemiomami, to powstaje pytanie: jak należy wymiarować rozwiązanie środkowe, zamazując, że granice są płynne i uwzględniając kwestię zarysowania przekroju betonowego. Można zwymiarować bezpiecznie, zgodnie ze stosowanymi normami projektowania, ale logiczne jest, że musi to prowadzić do przewymiarowania strzemiem i nie do końca odpowiada charakterowi pracy konstrukcji. Różne wydaje się podejście, w którym nośność przekroju określa minimalna z dwóch wartości, t.j. nośność wirtualnego przekroju stalowego oraz przekroju z betonu zbrojonego odnosząca się do pełnej wysokości (całkowitego obrysu) przekroju zespolonego przy założeniu wystarczającej nośności zespolenia na ścinanie podłużne. Granice stosowności takiego podejścia mogłyby być wyrażone np. w funkcji względnej wysokości lub srywności części składowych przekroju zespolonego. Mając na uwadze, że w budownictwie teoria powinna służyć praktyce, jej efektem użytkowym byłaby zoptymalizowana konstrukcja strzemiem.

Problem usystematyzowania przekrojów zespolonych w kontekście przenoszenia ścinania poprzecznego przedstawiono wstępnie w (1) – do końca 2011 roku zostanie wybudowany most kolejowy z zastosowaniem dźwigarów o przekroju jak na rys. 2.

Rys. 18 Fragment magazynu *Mosty* z przedstawionym problemem wymiarowania przekrojów hybrydowych na ścinanie poprzeczne [38]

Początkowo skupiłem się (podobnie jak W. Lorenc: uporczywie wspólnie szukaliśmy wtedy rozwiązania tego problemu) na zagadnieniu nośności na ścinanie przekroju, a wnioski z moich prac są zawarte w raporcie SPR z 2015 r.:

- [39] **M. Kozuch**, Nośność na ścinanie poprzeczne belek zespolonych z dużym udziałem części stalowej i betonowej. Raporty Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej. 2015, Ser. SPR nr 28,.

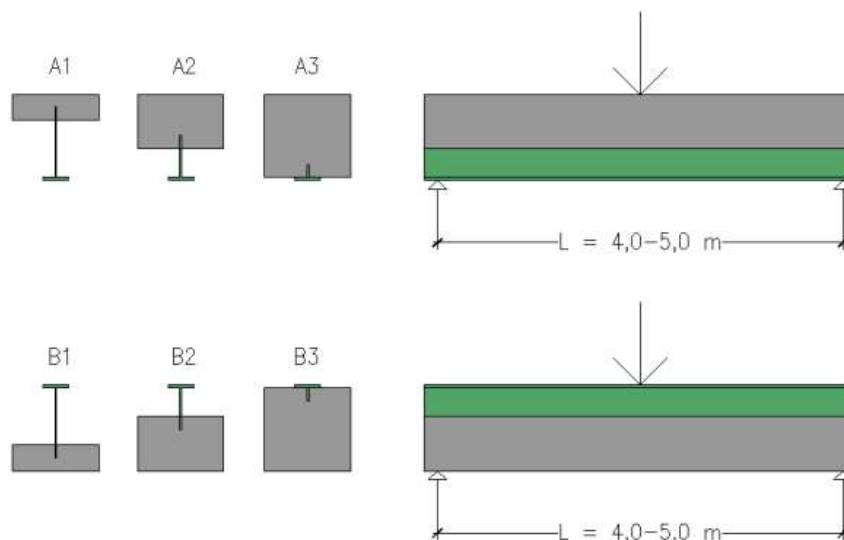
W ramach ww. opracowania stwierdziłem na podstawie wykonanych analiz numerycznych, że dla belek hybrydowych, w których zarówno część stalowa, jak i betonowa, mogą mieć znaczący udział w przenoszeniu ścinania poprzecznego, próba rozdzielenia siły tnącej osobno na część stalową i betonową wg założeń belki Bernoulli'ego – Euler'a, czy też Timoshenki nie zapewni poprawności wyników. Jeden ze sformułowanych wniosków brzmiał: „*rozdziel siły tnącej pomiędzy część stalową i betonową jest zagadnieniem złożonym, nie zależy on jedynie od stosunków sztywności giętych (jak w belce Bernoulli'ego – Euler'a), czy postaciowych (jak w belce Timoshenki), ale też od ogólnej geometrii przekroju poprzecznego wpływającej na transfer naprężeń normalnych od zginania*”. Powiązanie rozkładu naprężeń normalnych ze stycznymi w spójną koncepcję „ramienia sił” wykonał później W. Lorenc w 2017 r.:

- [40] W. Lorenc, The model for a general composite section resulting from the introduction of composite dowel. Steel Construction 10 (2017), No. 2.

i rozbudował z pomocą Prof. R. Johnsona do tzw. koncepcji przekroju hybrydowego w 2022 r.:

- [41] W. Lorenc, W. Kurz, G. Seidl, Hybrid steel – concrete sections for bridges: Definition and basis for design. Engineering Structures 270 (2022) 114902.

Natomiast już we wspomnianym raporcie SPR z 2015 r. przedstawiłem koncepcję badań doświadczalnych: „...*analiza wyników eksperymentalnych razem z analizą MES może potwierdzić opracowane zasady wymiarowania, biorące pod uwagę np. modele naprężeniowe w belce stalowej oraz modele $S - T$ w płycie betonowej. Aby osiągnąć zamierzony cel należałoby przebadać elementy belkowe o różnych udziałach części stalowej i betonowej w przekroju poprzecznym, poddane działaniu momentu zginającego o różnym znaku. Pierwszy czynnik (stosunek udziału stali i betonu w przekroju poprzecznym) pozwala na analizę rozdziału siły tnącej między stal i beton, drugi czynnik (znak momentu) pozwala określić wpływ zarysowania betonu na jego sztywność na ścinanie, a tym samym na wpływ tego zjawiska na redystrybucję siły tnącej.*”



Rys. 19 Koncepcja badań przedstawiona w autorskim raporcie SPR [39]

Warto zauważyć, że obecnie (czyli w roku 2024: prawie dziesięć lat później) mgr inż. Błażej Bartoszek w swojej pracy doktorskiej (promotorem jest W. Lorenc) wykonał badania zgodnie z proponowaną przeze mnie w SPR koncepcją (A2 wg rysunku powyżej) po uprzednim wspólnym (P. Kozioł / W. Lorenc / M. Kożuch) wykonaniu badań z wysokim średnikiem (A3 wg rysunku powyżej) i mając za podstawy teoretyczne propozycję W. Lorenca z 2017 roku. Dopiero w 2023 roku doprowadził nasze wspólne (W. Lorenc / M. Kożuch / B. Bartoszek) prace badawcze dotyczące sposobu wymiarowania na ścinanie do końca (obecnie procedura wdrożona w CEN-TS [20]).

Natomiast wykonując prace własne i tworząc proste modele MES (skrótowo przedstawiono w SPR) oraz mając do dyspozycji najnowsze wnioski z prowadzonych wdrożeń (W. Lorenc wspólnie z firmą Europrojekt Gdańsk S.A. zaprojektowali wtedy most w Elblągu, który został bardzo szybko wybudowany, efekty i przemyślenia z wdrożenia opublikowano potem w 2017 r.)

[42] W. Lorenc, T. Kołakowski, A. Hukowicz, G. Seidl, Verbundbrücke bei Elbląg: Weiterentwicklung der VFT-WIB-Bauweise. Stahlbau. 2017. Jg. 86, H. 2, s. 167-174.

nasunęło się kolejne pytanie: jak modelować nowe konstrukcje celem ich sprawnego wymiarowania? To jest ogólna wersja pytania, której bardziej szczegółowa odsłona brzmi: jakie będą zasady wykonywania analizy statycznej (analizy globalnej) nowego typu belek z uwzględnieniem zarysowania i reologii? Jeszcze bardziej sprowadzając pytanie do jego sedna można je postawić w następujący sposób: jak uwzględniać zarysowanie i reologię betonu na potrzeby redystrybucji sił wewnętrznych w belkach (rozważanego nowego typu) w odpowiednich stanach granicznych (ULS, FLS, SLS)?

Wspólnie z W. Lorencem mieliśmy świadomość nakładu prac, jaki należało wykonać, aby uzyskać wiedzę w tych dwóch kwestiach: 1) ścinanie poprzeczne, 2) redystrybucja sił na potrzeby analizy ogólnej i związane z tym sposoby modelowania za pomocą MES. Ponieważ

równolegle zajmowałem się opracowywaniem nowego systemu mostów z belek walcowanych (co wymagało również dużego nakładu pracy przy modelowaniu tych obiektów), w tym miejscu podjęliśmy wspólnie decyzję o dalszym podziale zadań. I tak: zdecydowaliśmy o wspólnym podsumowaniu stanu wiedzy dotyczącej modelowania belek mostowych pisząc monografię:

- [43] W. Lorenc, **M. Koźuch**, S. Balcerowiak, Wybrane zagadnienia modelowania przęseł mostów belkowych z dźwigarów zespolonych stalowo-betonowych. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2018.

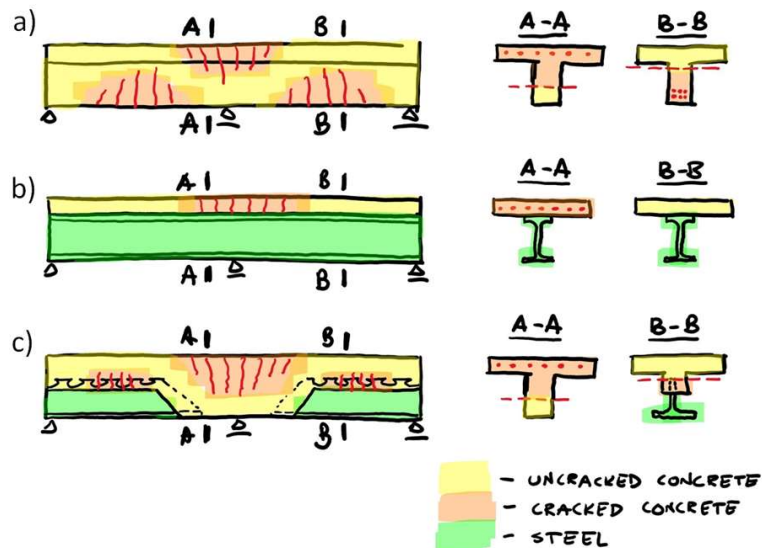
a następnie W. Lorenc skupił się na zagadnieniu ścinania poprzecznego, a ja zająłem się drugim tematem tj. metodyką modelowania belek hybrydowych na potrzeby analizy globalnej. **Prace, które wykonałem w tym zakresie (zwięźzione rolą sprawdzającego w projekcie nowych mostów hybrydowych w ciągu budowanej obecnie drogi S3 na odcinku Troszyn – Świno ujście, modelowanych z zastosowaniem moich koncepcji) uważam za swój istotny wkład w rozwój dyscypliny.**

Problematykę związaną ze ścinaniem poprzecznym (koncepcja przekroju hybrydowego – opracowana przez W. Lorenca) oraz z globalną analizą (statyczną) belek hybrydowych (koncepcja belki hybrydowej) przedstawiłem najpierw w formie skrótowej w:

- [44] **M. Koźuch**, Belki hybrydowe w mostach: definicja i koncepcja projektowania. Mosty, Tom nr 4 (2021).

I tak jak kwestia dystrybucji siły poprzecznej jest sednem koncepcji przekroju hybrydowego, tak kwestia redystrybucji momentów zginających na skutek zarysowania i reologii jest sednem będącej przedmiotem prac autora koncepcji belki hybrydowej. W projektowaniu belek żelbetowych, gdy stosowana jest analiza liniowo-sprężysta można zakładać m.in., że przekroje poprzeczne są niezarysowane (a analizując dodatkowo w ULS wpływy odkształceń termicznych, osiadań czy skurczu, a więc efektów zależnych wprost od przyjętej sztywności układu, można przyjmować przekroje zarysowane, pomijając nawet efekt *tension stiffening*). Takie podejście, przedstawione w Eurokodzie 2, jest uzasadnione, gdyż zarysowanie przekrojów poprzecznych zarówno w strefach przęsłowych, jak i podporowych belek ciągłych nie będzie wprowadzało znaczących zmian w dystrybucji stosunku sztywności części przęsłowej do podporowej po długości dźwigara (w stosunku do stanu pierwotnego, niezarysowanego). Inaczej ma się sytuacja w przypadku dźwigarów zespolonych, w których na belkach stalowych znajduje się płyta żelbetowa (a zatem w przypadkach przewidzianych w Eurokodzie 4). W najczęstszej sytuacji w przekrojach przęsłowych belek zginanych, na skutek działania dodatniego momentu zginającego, płyta żelbetowa jest zawsze ściskana. Inaczej wygląda sytuacja w przekrojach podporowych, obciążonych momentem ujemnym. Płyta żelbetowa ulega zarysowaniu, przez co zmniejsza się sztywność przekrojów podporowych, a co za tym idzie – zmienia się dystrybucja sztywności po długości dźwigara. Efekt zarysowania należy uwzględnić nie tylko przy wymiarowaniu przekrojów (jak w belkach żelbetowych), ale też w liniowo-sprężystej analizie globalnej, tj. rozwiązując statykę ustroju. Ogólne zasady są podane w Eurokodzie 4 dla belek stalowych zespolonych z płytą żelbetową znajdującą się nad ich pasem górnym, np. w ULS można przyjmować płytę zarysowaną w strefie podporowej, a dodatkowo w SLS uwzględnia się w

odpowiedni sposób przyrost naprężeń w zbrojeniu z uwagi na efekt *tension stiffening*. Przeprowadzenie analizy globalnej dla belek hybrydowych wykracza poza reguły ujęte w dostępnych opracowaniach. Po pierwsze, modelowanie zarysowania samej płyty żelbetowej nie może być wykonane wprost w oparciu o Eurokod 2 lub 4; jeśli przyjmie się w analizie płytę niezarysowaną doprowadzi się do przesztymienia strefy podporowej (bardzo konserwatywne i nieekonomiczne dla wymiarowania zbrojenia) oraz niedoszacowania sił wewnętrznych w części przęsłowej; przy przyjęciu płyty w całości zarysowanej – brak wytycznych, jak uwzględnić efekt *tension stiffening* przy sprawdzaniu rozwarcia rys w części podporowej, dla której z analizy globalnej otrzyma się niedoszacowane siły wewnętrzne. Po drugie, na dystrybucję sztywności po długości dźwigarów wpływ ma też zarysowanie środnika betonowego – zarówno w części przęsłowej, jak i podporowej. Ile tego środnika zarysować, i jaką sztywność części zarysowanej przyjąć? Wymienione zagadnienia można analizować dla belek hybrydowych o stałym przekroju na długości przęsła, a kolejną kwestią będzie zmiana przekroju z hybrydowego na żelbetowy w strefie podporowej przęseł – jak np. w dźwigarach mostów w ciągu drogi S3 Troszyny – Świnoujście. Problematykę tego przedstawiono schematycznie na poniższym rysunku.

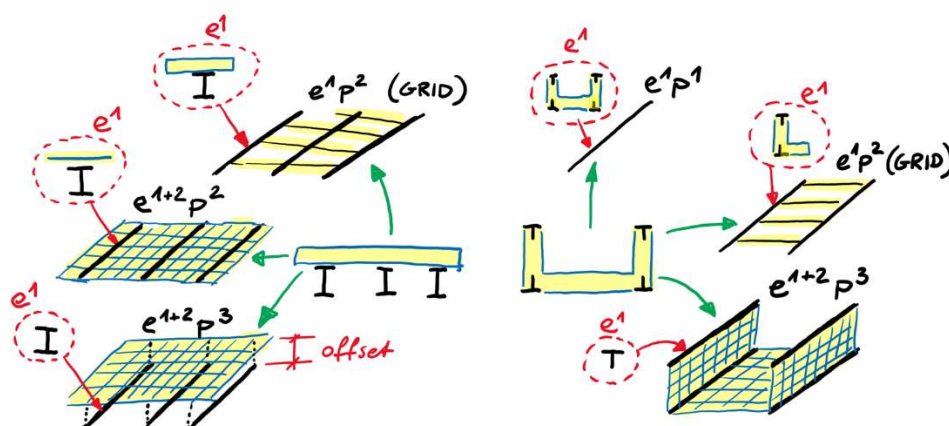


Rys. 20 Szkic z artykułu [45] przedstawiający stan zarysowania belek hybrydowych na tle belek żelbetowych i standardowych zespolonych

Zajmując się tym zagadnieniem należało równocześnie wziąć pod uwagę postęp w modelowaniu konstrukcji mostowych (w tym pomocnym było duże doświadczenie wnioskodawcy w wykonywaniu analiz statyczno-wytrzymałościowych mostów różnych typów). W *Eurokodzie 4* generalnym założeniem było wykorzystywanie statyki układów belkowych (stąd też warunki związane ze sztywnością przedstawiane są wprost w postaci EI belki, warunki nośności wprost w odniesieniu do sił wewnętrznych w elementach prętowych tj. M , N , V). Obecnie coraz częściej wykorzystuje się modele bardziej skomplikowane niż rusztowe, np. technikę belki na ofsecie (klasa $e^{1+2}p^2$), w którym płyta betonowa modelowana jest elementami powierzchniowymi, a belka stalowa elementem belkowym, lub jeszcze bardziej skomplikowane modele (klasy e^{1+2} (lub e^2) p^3), w których też belki stalowe modelowane są elementami powierzchniowymi. Jest to naturalna kolej rzeczy, gdzie coraz bardziej złożone zagadnienia rozwiązywane są wprost na drodze numerycznej. Wprowadzenie koncepcji przekrojów zarysowanych (wprost

w rozumieniu *Eurokodu 4*) poprzez redukcję sztywności giętej EI dźwigara zespolonego w przypadku modelowania np. belki na offsecie względem elementów powierzchniowych odwzorowujących płytę pomostową mogłoby odbyć się wyłącznie poprzez redukcję sztywności osiowej (ew. też giętej?) elementów powłokowych. Pojawiają się tutaj dyskusyjne pytania dotyczące wpływu takiej redukcji na pozostałe elementy macierzy sztywności elementów powłokowych (np. sztywność na ścinanie w płaszczyźnie pomostu, sztywność skrętna panelu itd.), które to zaburzyć mogą wyniki globalnej statyki analizowanego obiektu. Ogólne spojrzenie na tą kwestię przedstawiono w:

- [45] **M. Koźuch**, Ł. Skrętkowicz, Proposal of concept for structural modelling of hybrid beams, *Studia Geotechnica et Mechanica*, 2022; 1–16.



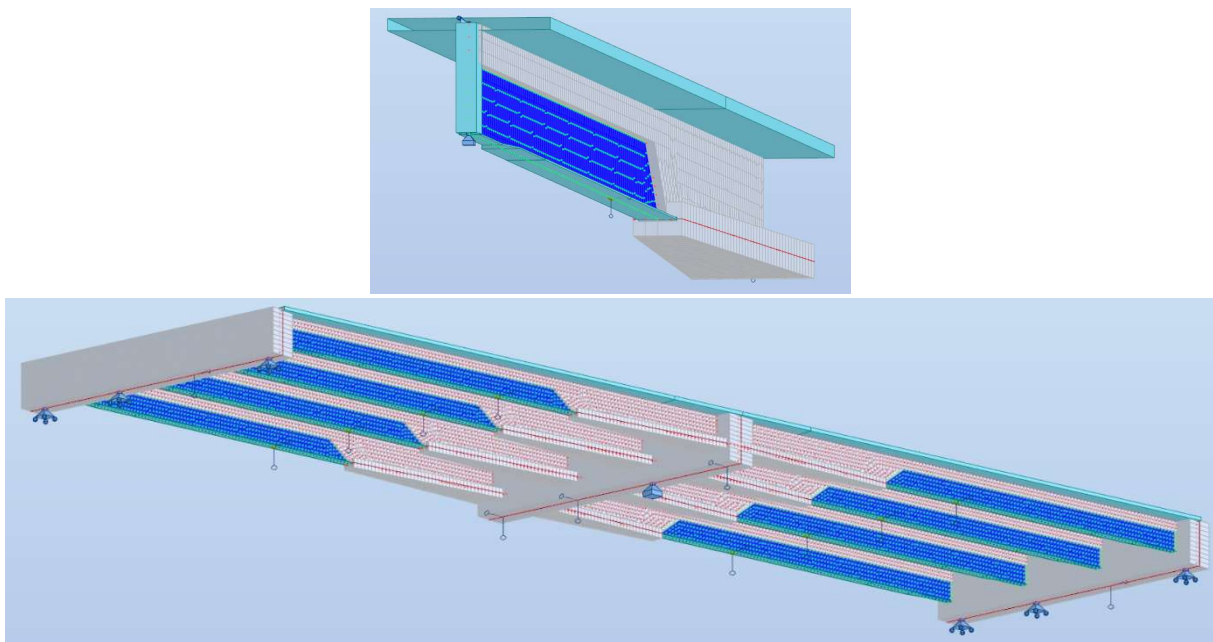
Rys. 21 Szkic z artykułu [45] przedstawiający wybrane możliwości modelowania ustrojów mostowych

Połączenie kwestii modelowania ustrojów hybrydowych z jednoczesnym uwzględnieniem zarysowania betonu i jego reologii w spójną koncepcję projektową belki hybrydowej zostało opisane w ww. artykule [45], a także rozwinięte w:

- [46] **M. Koźuch**, Ł. Skrętkowicz, Proposal of concept for global analysis of hybrid beams - numerical investigation. *Archives of Civil Engineering*. 2023, vol. 69, nr 4, s. 205-226.

W tych dwóch pozycjach ([45] i [46]) wnioskodawca opisał problematykę związaną z wymienionymi zagadnieniami, wykonał obliczenia numeryczne pokazujące mechanizm wpływu zjawisk zarysowania i reologii betonu w belkach hybrydowych na redystrybucję sił wewnętrznych – stosując różne podejścia numeryczne, następnie wykonał szereg analiz parametrycznych dla różnych geometrii i stopni wyęźnienia belek hybrydowych i na koniec przedstawił koncepcję belki hybrydowej. **Polega ona na propozycji zupełnego odwrócenia podejścia przyjętego w *Eurokodzie 4* polegającego na konieczności uwzględniania zarysowania i reologii betonu na poziomie statyki i przyjęciu założenia o wykonywaniu analizy globalnej w stanie niezarysowanym, z późniejszą ewentualną redystrybucją otrzymanych sił wewnętrznych.** Wartość samej redystrybucji (polegającej na zredukowaniu momentów podporowych w belce ciągłej i odpowiednim zwiększeniu momentów przęsłowych) byłaby uzależniona od stopnia

wyłączenia zbrojenia rozciąganego w strefie momentów podporowych. W [46] zostały zaprezentowane procentowe propozycje redukcji momentów podporowych, osobno dla sprawdzania nośności części podporowej i przęsłowej dźwigarów hybrydowych. Propozycja wykorzystania analizy w stanie niezarysowanym w analizie belek hybrydowych jest w pełni uzasadniona, gdyż poza zasadniczym ilościowym zagadnieniem redystrybucji momentów, wykazany w wykonanych analizach parametrycznych, istnieją dwa istotne czynniki przemawiające za jej przyjęciem. Po pierwsze, obserwacja, że konstrukcje hybrydowe stanowią rozwinięcie koncepcji żelbetu wykorzystującego sztywne elementy stalowe, mocno uzasadnia tę propozycję z historyczno-logicznego punktu widzenia teorii konstrukcji betonowych (podobnie do konstrukcji żelbetowych, reologia betonu, i częściowo też zarysowanie choć w znacznie mniejszym stopniu, dla dźwigarów hybrydowych jest znacznie mniej istotna niż dla standardowych dźwigarów zespolonych – po prostu zarówno w strefie przęsłowej, jak i podporowej, występują przekroje z betonem ściskany, a efekty reologiczne objawiają się głównie w deformacjach, a nie w zwiększonych siłach wewnętrznych w konstrukcji). Po drugie, odejście od modelowania betonu zarysowanego w strefie podpór pośrednich belek zespolonych jest ogromnym uproszczeniem technicznym w przypadku nowoczesnych metod modelowania konstrukcji z wykorzystaniem MES: umożliwia wydajne wymiarowanie betonu za pomocą automatycznych algorytmów przypisanych elementom powłokowym płyty pomostowej i środnikom belek hybrydowych, podczas gdy dla wymiarowania dźwigarów w strefie przęsłowej tylko jeden wynik (moment zginający lub odpowiednie naprężenie normalne) mnoży się przez odpowiedni współczynnik. Tym samym nowa koncepcja, będąca *de facto* odwróceniem procedury *Eurokodu 4*, jest uzasadniona na wielu płaszczyznach i wynika nie z chęci zmiany istniejących przepisów, ale z chęci systemowego rozwiązania trudności, jakie wnioskodawca napotkał przy projektowaniu belek hybrydowych zgodnie z obowiązującymi procedurami. Opracowana koncepcja była stosowana (jako jedno z podejść obliczeniowych) przy projektowaniu mostów hybrydowych w ciągu drogi S3 odcinek Troszyn – Świnoujście:



Rys. 22 Jeden z modeli MES wybranego wiaduktu z belkami hybrydowymi



Rys. 23 Grzebienie z łącznikami MCL o gr. 30 mm przed przyspawaniem do średników (gr. 12 mm) stalowych teowników



Rys. 24 Część stalowa belek hybrydowych



Rys. 25 Belka hybrydowa podczas prac zbrojarskich



Rys. 26 Prefabrykowana belka hybrydowa



Rys. 27 Belki hybrydowe ułożone na podporach stałych i tymczasowych (w L/2 przęsła)



Rys. 28 Montaż belek hybrydowych na moście M-7L (część dojazdowa: 13 przęseł mostu w formie belki ciągłej uramowanej na 3 wewnętrznych filarach)



Rys. 29 Prace na moście M-7L (część dojazdowa 13 przęseł mostu w formie belki ciągłej uramowanej na 3 wewnętrznych filarach) (s3.dargobadz-troszyn.pl/galeria)

Jako cykl publikacji podsumowujący ww. działania przedstawiam co następuje, przy czym najistotniejsze (z mojego punktu widzenia) publikacje przedstawiłem wytłuszczonym drukiem. Podpisy współautorów potwierdzające mój wkład w ich opracowanie znajdują się w zał. 5.

[36], [37], [39], [43], [44], [45], [46].

Poz.	Tytuł opracowania	Autorzy	Opis	Wkład wnioskodawcy
[36]	VFT-RAIL: nowa technologia budowy zespołonych przęseł mostów kolejowych na przykładzie przebudowy mostu Simmerbach w Niemczech. <i>Mosty (Katowice). 2013, nr 2</i>	G. Seidl, W. Lorenc, M. Kożuch, S. Rowiński	Referat opisujący jedno z pierwszych wdrożeń mostowych z łącznikami MCL. Pokazana jest technologia budowy i wybrane aspekty projektowania	Współautor treści artykułu
[37]	Problem definicji przekroju zespolonego stalowo-betonowego na tle stosowanych obecnie w mostownictwie rozwiązań konstrukcyjnych <i>Obiekty mostowe w infrastrukturze miejskiej.</i>	M. Kożuch, T. Kołakowski, W. Lorenc, E. Petzek, S. Rowiński, G. Seidl	Przedstawienie niektórych aspektów projektowania belek hybrydowych wykraczających poza ujęcia normowe, głównie w kontekście wymiarowanie przekrojów poprzecznych na ścianie pionowe –	Współautor treści artykułu

	<i>Wrocławskie Dni Mostowe. Wrocław, 2013</i>		przedstawione na tle realizowanych ówczesnie obiektów mostowych	
[39]	<p>Nośność na ścinanie poprzeczne belek zespolonych z dużym udziałem części stalowej i betonowej</p> <p><i>Raporty Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej. 2015, Ser. SPR nr 28</i></p>	M. Kożuch	<p>Przedstawienie problematyki rozdziału siły tnącej na część stalową i betonową belki hybrydowej, wykazanie że algorytmy postępowania wg teorii belki Bernoulliego i Timoshenki nie są spełnione, opracowanie koncepcji badań doświadczalnych belek hybrydowych na potrzeby rozpoznania mechanizmu transferu siły tnącej (wykorzystane później przy doktoracie B. Bartoszka)</p>	Praca samodzielna
[43]	<p>Wybrane zagadnienia modelowania przęseł mostów belkowych z dźwigarów zespolonych stalowo-betonowych</p> <p><i>Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2018</i></p>	W. Lorenc, M. Kożuch, S. Balcerowiak	<p>Monografia, w której zebrano syntetycznie zagadnienia i powszechną praktykę inżynierską dot. modelowania mostów zespolonych oraz przedstawiono wybrane problemy z tym związane. Opracowano także przykład obliczeniowy pokazujący sposób modelowania i analizy wyników przy modelu belki na offsecie i z wykorzystaniem elementów cienkościennych z ortotropową płytą betonową</p>	Współtwórca treści monografii, autor przykładu obliczeniowego (rozdz. 8)
[44]	<p>Belki hybrydowe w mostach: definicja i koncepcja projektowania</p> <p><i>Mosty, Tom nr 4 (2021)</i></p>	M. Kożuch	<p>Artykuł problemowy opisujący aktualny stan wiedzy dot. projektowania belek hybrydowych – tj. rozwiązane zagadnienia związane ze ścinaniem poprzecznym i wciąż nierozwiązane zagadnienia związane z wykonywaniem analizy globalnej belek hybrydowych. Artykuł wprowadzający w dalsze prace prowadzące do powstania koncepcji belki hybrydowej</p>	Praca samodzielna

[45]	<p>Proposal of concept for structural modelling of hybrid beams</p> <p><i>Studia Geotechnica et Mechanica, 2022</i></p>	M. Kożuch, Ł. Skrętkowicz	<p>Identyfikacja problematyki modelowania belek hybrydowych na tle zrealizowanych projektów obiektów z dźwigarami hybrydowymi, w tym odniesienie się do kwestii zarysowania betonu, jego reologii oraz nowoczesnych sposobów modelowania MES. Zwięzły opis zagadnienia <i>tenison stiffening</i>, wykonanie analizy numerycznej (w różnych wariantach, przy różnych założeniach) przedstawiającej wpływ ujęcia zarysowania i reologii betonu na wyniki analizy statycznej przykładowej belki hybrydowej. Wstępna definicja koncepcji projektowej wykonywania analizy globalnej belek hybrydowych.</p>	<p>Zdefiniowanie problematyki związanej z analizą globalną belek hybrydowych, opracowanie koncepcji analiz numerycznych oraz wykonanie tych analiz w dwóch z trzech przedstawionych wariantach (podejście iteracyjne z sukcesywnym rozwojem zarysowania w miejscu przekroczenia przyjętych granicznych naprężeń rozciągających w betonie oraz podejście uproszczone ze z góry przyjętym zakresem zarysowania, trzecie podejście numeryczne z nieliniowym betonem wykonał współautor), analiza i omówienie otrzymanych wyników oraz sformułowanie wstępnej koncepcji belki hybrydowej (tj. propozycji przeprowadzania analizy globalnej dla obiektów z belkami hybrydowymi)</p>
[46]	<p>Proposal of concept for global analysis of hybrid beams - numerical investigation</p> <p><i>Archives of Civil Engineering. 2023, vol. 69, nr 4</i></p>	M. Kożuch, Ł. Skrętkowicz	<p>Wprowadzenie w zagadnienia globalnej analizy sprężystej belek hybrydowych na tle przeprowadzonych badań doświadczalnych oraz zaprojektowanych przez wnioskodawcę obiektów hybrydowych oraz wykonanie parametrycznych analiz numerycznych różnych belek hybrydowych o rozpiętościach od 20 do 40 m i o różnym stopniu wytyżenia z uwagi na zbrojenie betonu w strefie rozciąganej. Sformułowano tutaj koncepcję belki hybrydowej tj. propozycję</p>	<p>Definicja problematyki na tle posiadanych doświadczeń z projektowania obiektów hybrydowych, koncepcja przeprowadzenia parametrycznych analiz numerycznych, analiza liczbowa wyników, sformułowanie koncepcji belki hybrydowej polegającej na wykonywaniu analizy globalnej w stanie niezarysowanym z późniejszą odpowiednią redystrybucją sił wewnętrznych (lub modyfikacją otrzymanych naprężeń) oraz podanie liczbowych zalecanych zakresów redystrybucji.</p>

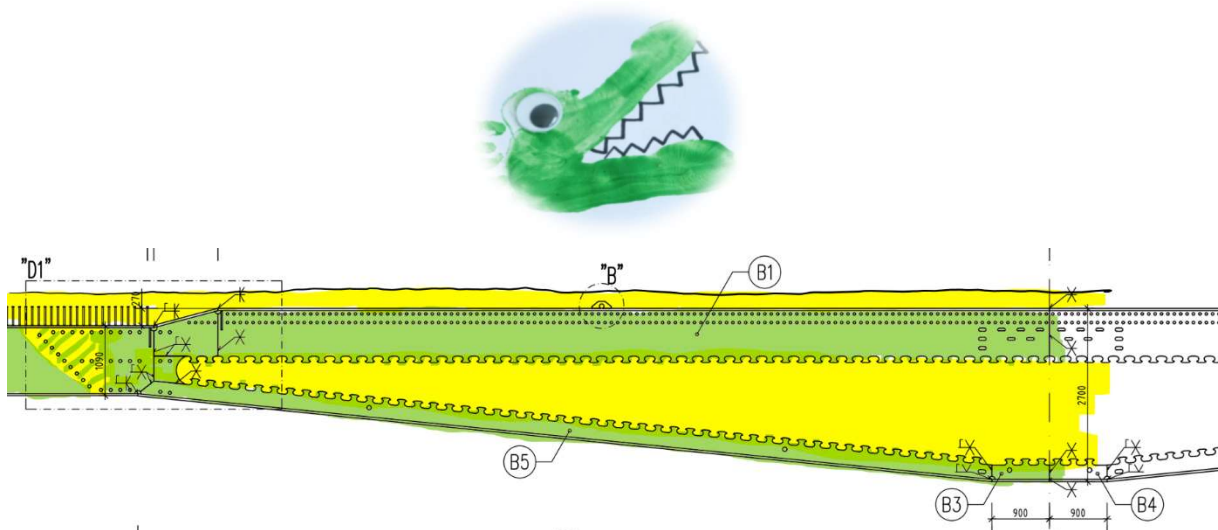
			<p>wykonywania globalnej analizy sprężystej obiektów hybrydowych (odwracając podejście EC4 i proponując analizę w stanie niezarysowanym z późniejszą redystrybucją odpowiednich sił wewnętrznych)</p>	
--	--	--	---	--

4.3 Osiągnięcie nr 3

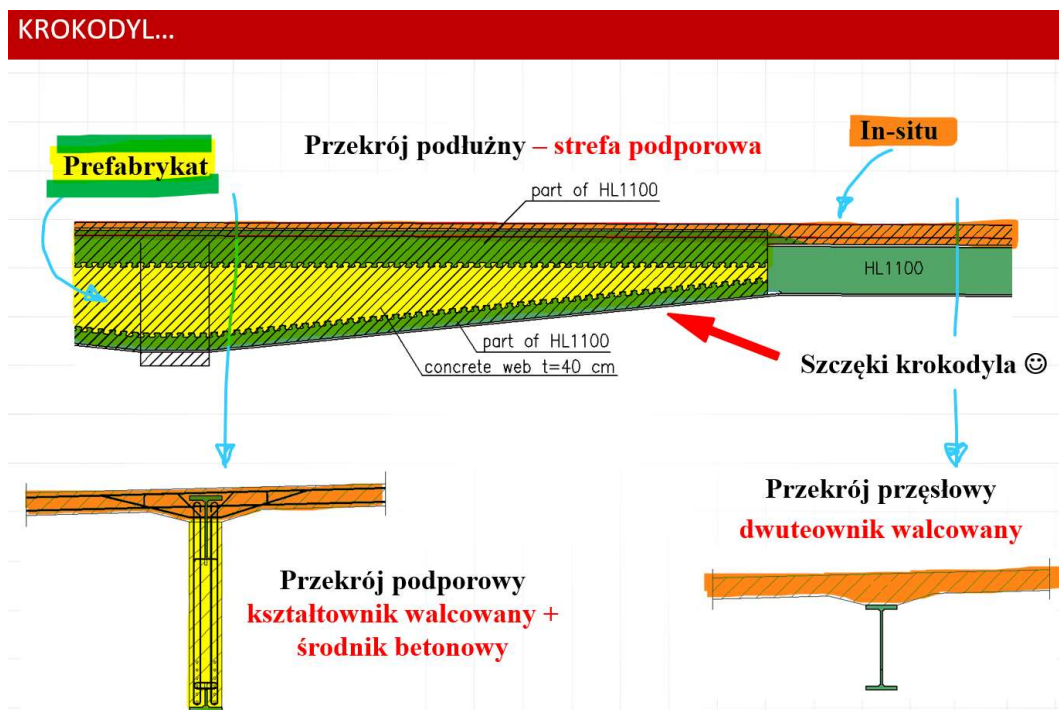
Tytuł osiągnięcia: **Dzielo projektowe: rozwinięcie systemu budowy mostów o rozpiętości ponad 50 m z zastosowaniem kształtowników walcowanych zwieńczone projektem mostu w nowym systemie „Krokodyl” wprowadzającym dźwigary hybrydowe**

- **będące oryginalnym osiągnięciem projektowym, konstrukcyjnym, technologicznym lub artystycznym, zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2c ustawy**

W 2021 roku zaprojektowałem most (M3 nad rzeką Kwisą w ciągu DP nr 1064F w Żaganiu) o zupełnie nowatorskiej konstrukcji, a możliwe to było poprzez syntezę rozwiązań i wiedzy osiągniętej w trakcie prac nad nowym systemem mostów o rozpiętości ponad 50 m z kształtowników walcowanych w połączeniu z doświadczeniami uzyskanymi podczas prac nad łącznikami typu *composite dowels* i wykonanymi analizami dot. koncepcji belki hybrydowej. Jest to unikatowa konstrukcja (obecnie w trakcie budowy) o najdłuższym przęśle z dźwigarów hybrydowych (55.62 m) i największej wysokości przekroju hybrydowego, stanowiąca połączenie wielu niezależnie rozwijanych (dotychczas) technologii i rozwiązań konstrukcyjnych. Jednocześnie okazała się ona na tyle ekonomiczna, że obecnie przystępuję do projektu drugiego takiego obiektu. Tym samym udało się stworzyć zupełnie nowy system do budowy mostów o rozpiętościach przęseł około 50-60 m. Jego ideę przedstawiono poniżej na rysunkach, następnie zaprezentowano tło „historyczne” celem jasnego przedstawienia genezy systemu zwanego roboczo „Krokodyl”, a na samym końcu przedstawiono szczegóły zaprojektowanego mostu.



Rys. 30 Idea dźwigara typu „Krokodyl”



Rys. 31 Idea dźwigara typu „Krokodyl” – jeden ze slajdów prezentacji wygłoszonej na Seminarium Wrocławskie Dni Mostowe 2022 [49]

Początki opisywanego systemu (poprzedzającego obecnie wdrażany, tzn. wykorzystującego klasyczne rozwiązania zespolone, a nie jak obecnie dźwigary hybrydowe) sięgają roku 2014, gdy na zlecenie firmy ArcelorMittal rozpoczęliśmy wspólnie z W. Lorencem pracę nad nowym system z belek walcowanych umożliwiającym osiągnięcie rozpiętości przęsła ponad 50 m:

- [47] **M. Kożuch**, W. Lorenc, Innovative design of composite bridges for medium spans based on rolled sections. dostępne online: https://sections.arcelormittal.com/repository2/Sections/3_Innovative_design_Tandem_solution_AM.pdf

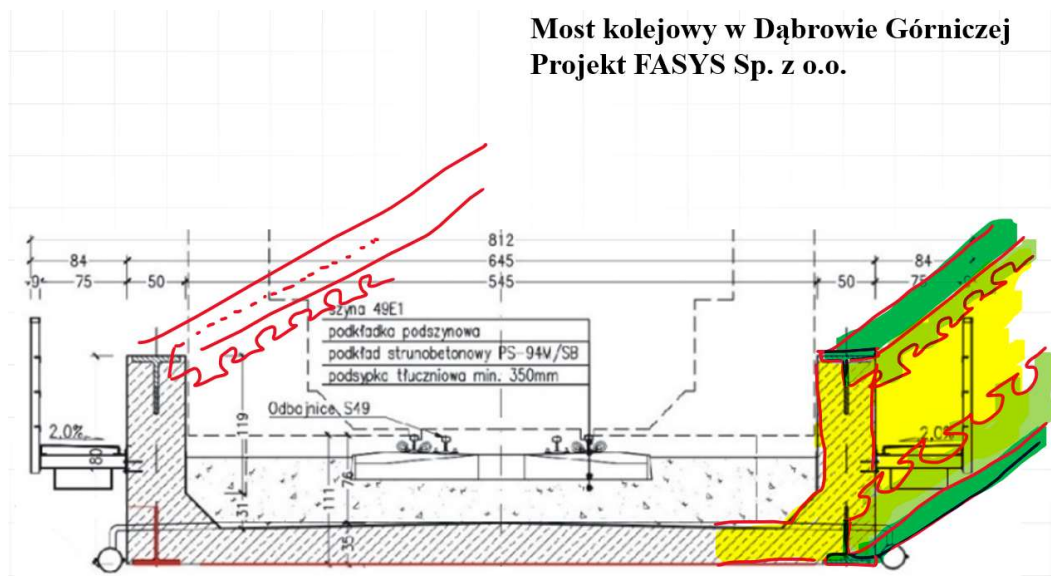
po tym, jak zaproponował on w ramach współpracy z firmą Promost we Wrocławiu i przy wsparciu Gminy Wrocław (w ramach programu MOZART w edycji 2014/2015), aby zastosować zmienną wysokość konstrukcyjną przy podporze i łączyć dźwigary w tandemy, a pomiędzy nimi wykonywać płytę betonową przy podporach. Wspólnie opracowywaliśmy szczegóły technologii dla firmy ArcelorMittal w ramach zleconego mojej firmie projektu R&D [38] i zaprojektowaliśmy następnie most w ciągu ul. Niemodlińskiej w Opolu (będący pierwszym zrealizowanym w tej technologii). Po realizacji doszliśmy do wniosku (doświadczenia z budowy), że rozwiązanie z tandemami ze względu na relatywnie małą sztywność skrętną nie zapewnia wystarczającej sztywności skrętnej tandemu na czas wykonywania płyty i konieczna jest instalacja tymczasowych stężeń zapobiegających zwichrzeniu dźwigarów w czasie układania mieszanki betonowej płyty pomostowej. Skłoniło nas to do poszukiwania innych rozwiązań: projektanci z firmy Fasys Mosty we Wrocławiu (z którymi współpracowaliśmy) zaczęli stosować układ 4x1 zamiast 2x2 i zrezygnowali z płyty betonowej, a R. Sęk przy współpracy z W. Lorencem zastosował na moście w Rzuchowie również układ 4x1, a przy tym rozcięte dwuteowniki w przęsle oraz zespoloną płytę dolną nad podporami pośrednimi. Ogólnie dużo wtedy pracowaliśmy poszukując optymalnych rozwiązań – doświadczenia z projektów oraz budów mostów, w których braliśmy udział jako projektanci lub konsultanci przedstawiliśmy w poniższych publikacjach:

- [48] **M. Koźuch**, W. Lorenc, J. Rabięga, W. Ochojski, Technologia budowy mostu drogowego o rozpiętości przęsła powyżej 50 m z dźwigarów walcowanych. Mosty: przemiany w projektowaniu i technologiach budowy: Seminarium Naukowo-Techniczne Wrocławskie Dni Mostowe, Wrocław, 2017. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2017, s. 229-237.
- [49] **M. Koźuch**, W. Lorenc, J. Rabięga, W. Ochojski, Rozwój technologii budowy mostów o średniej i dużej rozpiętości przęsła z dźwigarów walcowanych. Mosty (Katowice). 2018, nr 2, s. 58-61.
- [50] D. Rademacher, W. Ochojski, W. Lorenc, **M. Koźuch**, Advanced solutions with hot-rolled sections for economical and durable bridges. Steel Construction. 2018, vol. 11, nr 3, s. 196-204.
- [51] W. Lorenc, **M. Koźuch**, D. Rademacher, W. Ochojski, Advanced solutions with hot-rolled sections for more economical bridges. 9th International Symposium on Steel Bridges, Prague, Czech Republic, 2018. IOP Publishing, 2018. art. 012016, s. 1-8.
- [52] R. Sęk, P. Wyrwas, Ł. Dzida, D. Tokarczyk, W. Ochojski, W. Lorenc, **M. Koźuch**, Przęsło z podwójnym zespoleniem o rozpiętości 68 m z zastosowaniem rozcinanych belek walcowanych. Mosty hybrydowe: Seminarium Naukowo-Techniczne Wrocławskie Dni Mostowe, 2018. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2018, s. 127-133.
- [53] D. Rademacher, W. Ochojski, W. Lorenc, **M. Koźuch**, Profile gorącowalcowane : zaawansowane rozwiązania do budowy ekonomicznych i trwałych mostów. Cz. 1. Mosty (Katowice). 2018, nr 6, s. 58-61.
- [54] J. Kałuża, **M. Koźuch**, W. Lorenc, W. Ochojski, R. Sęk, D. Tokarczyk, P. Wyrwas, Przebudowa mostu przez San w Rzuchowie. Nowoczesne Budownictwo Inżynierskie. 2019, nr 4, s. 96-98.

W latach 2018/2019 W. Lorenc skupił się na nowym rozwiązaniu mostu kolejowego z zastosowaniem przekrojów hybrydowych projektowanym przez Fasys Mosty we Wrocławiu (i będącym rozwinięciem rozwiązania zaproponowanego przez G. Seidla) rozpoczynając współpracę ze swoim nowym doktorantem B. Bartoszkim, który zaprojektował ten most (wspominam o tym, ponieważ realizacja tej konstrukcji była impulsem do dalszego rozwoju opisywanego tutaj systemu), a ja równolegle rozwijałem system projektując przez swoją firmę kilka wariantów wiaduktu WS-17 w km 13+380,13 drogi S52 węzeł Modlnica – węzeł Mistrzejowice na zlecenie biura Creator (H. Windorpskiego), w którym rozwijałem różne rozwiązania strefy podporowej oraz poprzecznicy stosując różne warianty środniczki stalowej, ale wprowadzając betonową poprzecznicę i rezygnując z płyty betonowej. Obiekt ten miał rozpiętości przęsła 39.0 + 54.1 + 39.0 m, a w czasie jego projektowania pojawiły się pierwsze pomysły związane z później opracowanym systemem „Krokodyl”. Na potrzeby wykonywania tego projektu oraz wcześniej opisanych projektów mostów hybrydowych w ciągu drogi S3 wykonywałem analizy związane z opracowaniem koncepcji belki hybrydowej (opisanej wcześniej). Po wprowadzeniu *Eurokodów* (tzn. umożliwieniu przez Zamawiających projektowania wg *Eurokodów*, a nie norm PN-S) wytyczenie kolejnych projektowanych obiektów było coraz większe (w stosunku do np. mostu w ciągu ul. Niemodlińskiej w Opolu), przy czym docelowym krokiem było wprowadzenie koncepcji projektowania plastycznego (wykonaliśmy zespołowo w tym kierunku odpowiednie badania razem z firmą ArcelorMittal):

- [55] **M. Koźuch**, W. Lorenc, K. Marcinczak, Report on the R&D works on the topic of plastic hinge behaviour and practical application of plastic or nonlinear design for cross-sectional resistance in steel-concrete composite bridges, ArcelorMittal Report, 2022.
- [56] K. Marcinczak, **M. Koźuch**, W. Lorenc, R. Zanon, W. Ochojski, Uwiarygodnienie koncepcji "projektowania plastycznego" belek mostowych zgodnie z Eurokodem 4: badania niszczące w skali naturalnej zespolonych belek mostowych złożonych z dwuteownika HL1100 i płyty betonowej. Mosty (Katowice). 2023, nr 3, s. 25-28.
- [57] K. Marcinczak, **M. Koźuch**, W. Lorenc, K. Raduszkiewicz, R. Zanon, W. Ochojski, M. Tibolt, Plastic design of composite cross-sections for bridges made of rolled I-sections, Seminarium Naukowo-Techniczne Wrocławskie Dni Mostowe, Wrocław, 2023.

Wszystkie opisywane mosty były ostatecznie wykonane ze stalowymi środniczkami. W końcu w 2021 roku na zlecenie firmy Creator moja firma brała udział w wykonaniu projektu mostu M3 nad rzeką Kwisą w ciągu DP nr 1064F w Żaganie o zupełnie nowej formie i konstrukcji: stanowi ona połączenie zasadniczego pomysłu z mostu w ciągu ul. Niemodlińskiej w Opolu z koncepcją wprowadzającą *doweł* i betonowy środek w miejsce stalowego przy podporze pośredniej (zastosowaną w moście z prefabrykowanych dźwigarów VFT-WIB w Elblągu), ale z zastosowaniem koncepcji podwójnego zespolenia zastosowanej przez B. Bartoszkę w moście kolejowym w Dąbrowie Górniczej.



Rys. 32 Most kolejowy w Dąbrowie Górniczej – jeden ze slajdów prezentacji wygłoszonej na Seminarium Wrocławskie Dni Mostowe 2022 [49]

Jestem Projektantem tego obiektu (wraz ze zlecającym mi zaprojektowanie tej konstrukcji H. Windorpskim): byłem odpowiedzialny za projekt konstrukcji i obliczenia statyczno-wytrzymałościowe, a biuro Creator zajmowało się koordynacją tematu od strony formalno-prawnej i opracowało rysunki. Jednocześnie wprowadzono tu nowy element polegający na myślowym „odwróceniu” przekroju z Dąbrowy Górniczej z jednoczesnym „schowaniem” przekroju stalowego w strefie podporowej w płycie pomostowej (jednocześnie zwiększając ramię sił wewnętrznych w tzw. fazie stalowej). Pomysł ten został opisany w:

- [58] **M. Koźuch**, H. Windorpski, M. Struczyński, W. Ochojski, Mosty zespolone o konstrukcji Krokodyl o rozpiętości przęsła 50-60 m. Wyzwania współczesnego mostownictwa: Seminarium Naukowo-Techniczne Wrocławskie Dni Mostowe, Wrocław 2022. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2022. s. 203-210.
- [59] **M. Koźuch**, W. Lorenc, B. Bartoszek, A. Stempniewicz, H. Windorpski, M. Struczyński, R. Sęk, W. Ochojski, Application of rolled sections in composite bridges with span over 50 meters. Ce/papers (Ernst & Sohn GmbH.) 2023, vol. 6, nr 1, s. 518-529.

Genezę rozwiązania pokazano na tle innych projektowanych wówczas mostów na poniższym rysunku.

section is inclined) and “teeth” of composite dowels are shaping in the side-view the “crocodile jaws”. It is a good example how the initial simple idea [1] (what is well explained in [2]) can be developed to complex composite solution that become a new marked product, more economic than traditional ones.

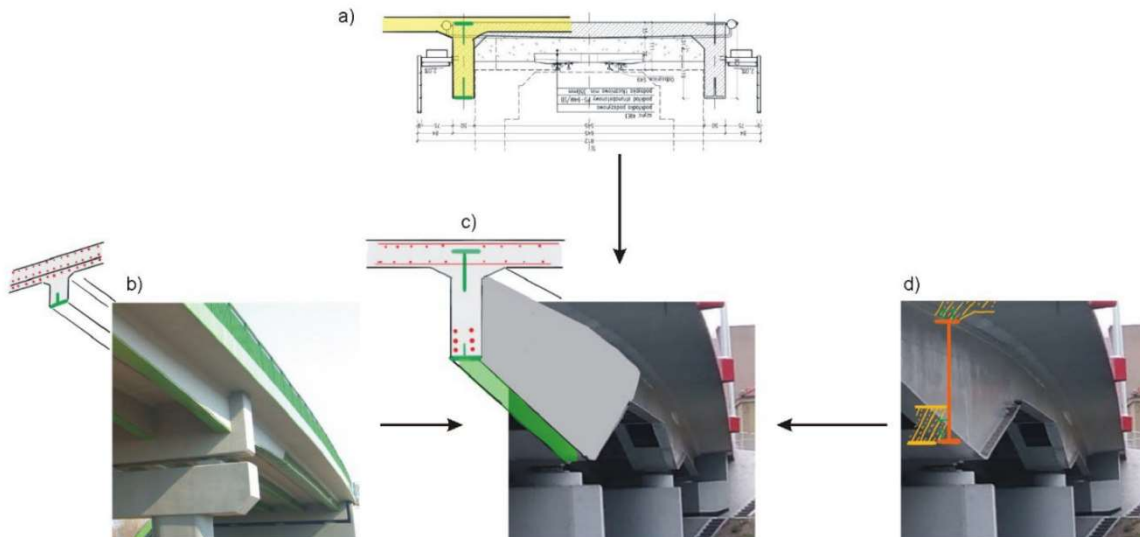


Figure 19. Chosen ideas for intermediate support zones in bridges with spans out of HL1100 sections leading to development of a “crocodile” solution: a) upside-down view of cross section of Dąbrowa bridge [6], b) Elbląg bridge [7], c) “crocodile” solution, d) Opole or Rzuchów bridge [3]

Rys. 33 Geneza systemu „Krokodyl” na tle innych projektowanych wówczas mostów, wycinek z artykułu [59]

Jednocześnie wprowadzono tutaj stal trudnordzewiejącą (czyniąc tym samym z opisywanej konstrukcji most o największej rozpiętości przęsła zaprojektowany ze stali S460J2W, rozpiętości przęseł wynoszą 37.11 + 55.62 + 37.84 m). Tym samym powstaje konstrukcja, która w strefie przęsłowej posiada konwencjonalny przekrój zespolony, a w strefie podporowej posiada zupełnie nowy typ złożonego przekroju hybrydowego.

Przekrój ten cechuje się między innymi tym, że transfer ścinania jest realizowany za pomocą *doweli*, łączników PBL (listwa *Perfobond*) i tarcia (jak w przypadku dźwigarów obetonowanych) jednocześnie – co jest samo w sobie zagadnieniem nowym. Jednocześnie powstaje nowy problem zamodelowania obiektu i wykonania jego analizy statyczno-wytrzymałościowej, ze szczególnym zwróceniem uwagi na kwestie redystrybucji sił wewnętrznych na potrzeby analizy globalnej – wykorzystałem tutaj doświadczenia uzyskane podczas rozwiązywania problemów projektowania dźwigarów hybrydowych na potrzeby drogi S3, ale z uwzględnieniem specyfiki tego szczególnego obiektu (jest to jak dotąd najdłuższe przęsło z przekrojem hybrydowym i jest to przekrój o największej wysokości z dotychczas stosowanych). Ponieważ nie stosuje się sprężenia płyty kwestie zarysowania tak wysokich środków są istotne. Dodatkowo należało zaproponować nową technologię budowy i betonowania takich dźwigarów – założono betonowanie w dwóch głównych fazach: najpierw środek części hybrydowej (który dodatkowo może być betonowany z podziałem na dwie części: dolną skośną oraz górną), następnie płyta pomostowa (i tak też było to modelowane).

Poniżej pokazano nowe rozwiązanie tzw. strefy przejściowej. Zwraca się uwagę na występowanie różnego rodzaju łączników tj. klasycznych sworzni, *doweli* i łączników PBL o średnicy 50 mm – takie kombinowane łączenie różnych zespołów nie było dotychczas stosowane (i wyznacza jeden z trendów nowych prac badawczych mających m. in. odpowiedzieć na pytanie w jaki sposób je wymiarować – w zależności od rozpatrywanego stanu granicznego – dwa typy łączników przenoszących ten sam strumień ścinania: tutaj *dowełe* i PBL):

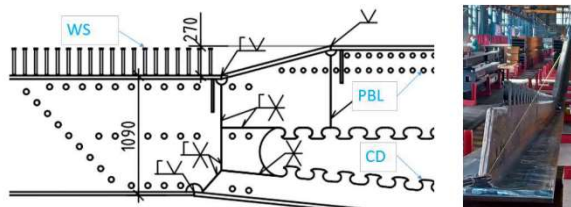


Fig. 20. Steel parts of “crocodile” girder: different types of shear connection at the left (WS: welded studs, PBL: perfobond, CD: composite dowels) and production of steel parts in Luxembourg (picture by ArcelorMittal)

Rys. 34 Strefa przejściowa między przekrojem przęsłowym i strefą podporową „Krokodyl”

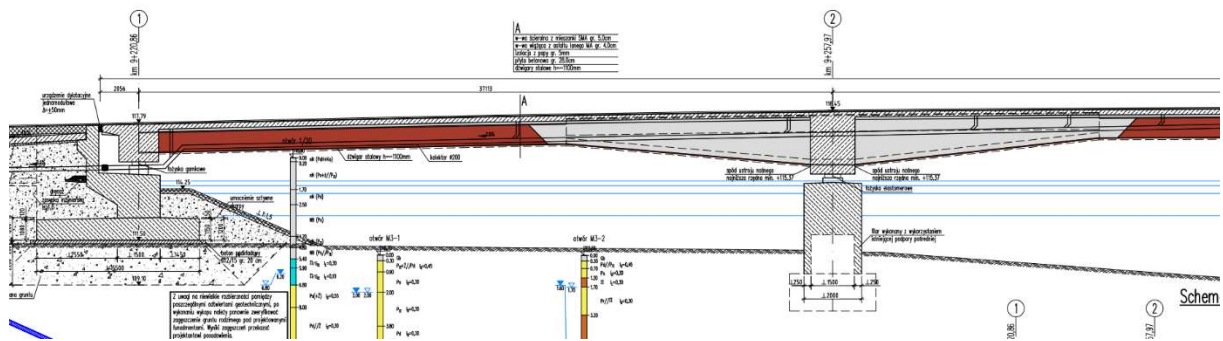
Obecnie nie mam wielu publikacji dotyczących tego nowego rozwiązania, ponieważ pierwszy most właśnie jest budowany; wspólnie z kolegami przedstawiamy je dopiero wstępnie na konferencjach jako jeden z nowych systemów hybrydowych (w tym przypadku ten umożliwiający pokonywanie największej rozpiętości przęseł w ramach możliwych do pokonania za pomocą belek hybrydowych). W 2024 r. planowana jest prezentacja tej technologii na co najmniej 2 międzynarodowych konferencjach technicznych (Nordic steel 2024 w Luleå, Szwecja oraz Mosty 2024 w Brno, Czechy).

Skupiamy się na projektowaniu kolejnych obiektów i ich optymalizacji. Po wykonaniu obciążeń próbnych i zebraniu odpowiedniej wiedzy przestąpię do publikacji wyników w odpowiednich czasopismach, ale już teraz można zauważyć ogromne zalety tego rozwiązania względem rozwiązań konkurencyjnych (z typowymi dźwigarami stalowymi w strefie podpór pośrednich), tj.:

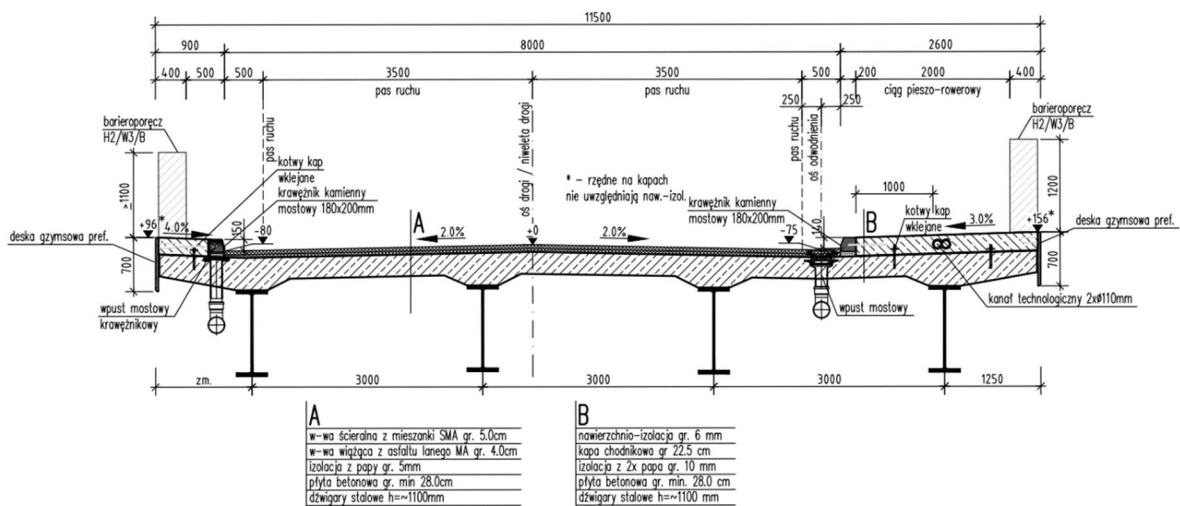
- brak środnika stalowego w części przypodporowej = mniej stali, mniej malowania, brak spawania, brak zagrożenia lokalnej utraty stateczności środnika,
- środek betonowy = duża sztywność giętna z płaszczyzny = brak problemów ze statecznością globalną (wyboczenie pasa dolnego z płaszczyzny),
- beton w strefie dolnej przenosi ściskanie od M-, co skutkuje możliwą znaczną optymalizacją zużycia stali konstrukcyjnej w pasie dolnym, oraz ogólnym zwiększeniem sztywności części podporowej, a zatem zmniejszeniem momentów przęsłowych.

Porównując zużycie stali konstrukcyjnej w moście M3 (system „Krokodyl”) o rozpiętości przęseł 37.11 + 55.62 + 37.84 m, tj. 130 kg/m², do zużycia stali w moście w ciągu ul. Niemodlińskiej w Opolu (stanowiącym niejako punkt wyjścia do dalszych modyfikacji konstrukcyjnych) o rozpiętości przęseł 42.0 + 54.0 + 42.0 m, a zatem o rozpiętościach bardzo zbliżonych, tj. 193 kg/m² zauważa się znaczącą optymalizację (i wciąż uważam, że możliwa jest dalsza nieznaczna optymalizacja).

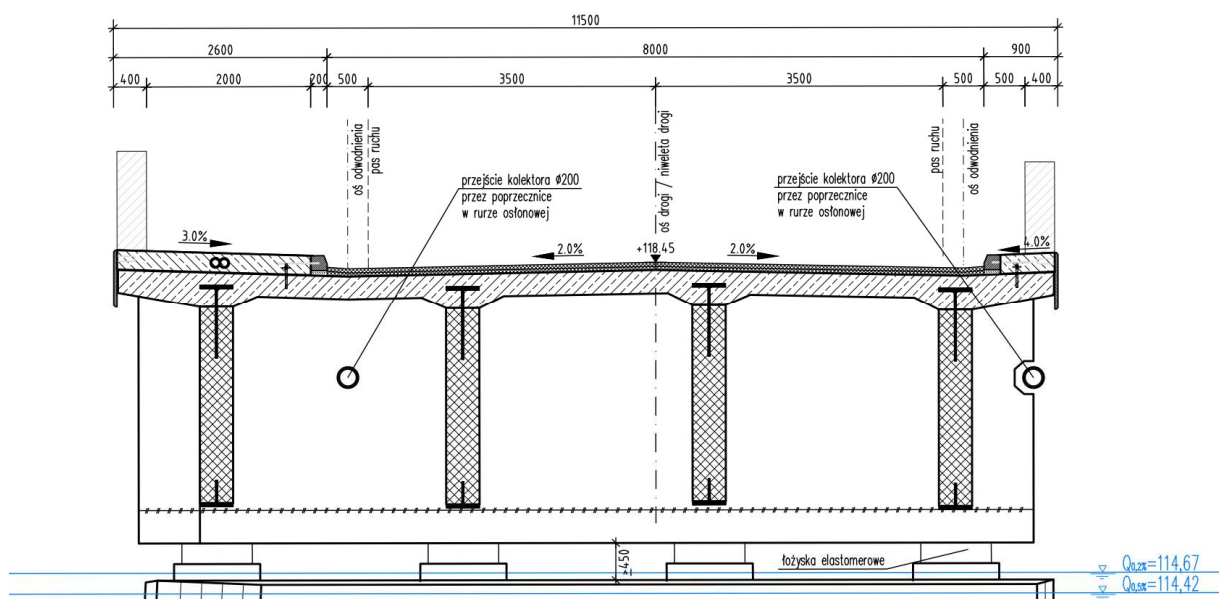
Poniżej przedstawiam fragmenty z projektu wykonawczego przedmiotowego mostu.



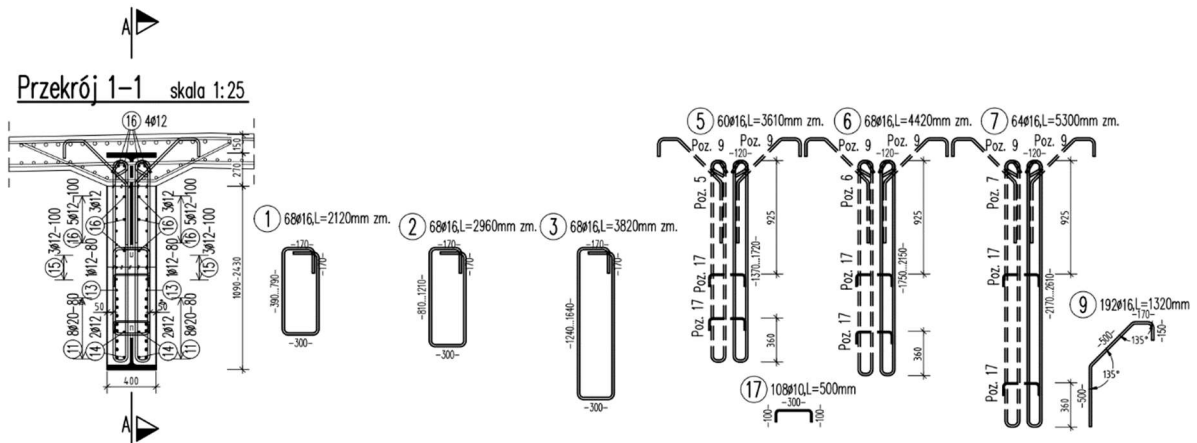
Rys. 35 Fragment przekroju podłużnego mostu M3 w Żaganiu



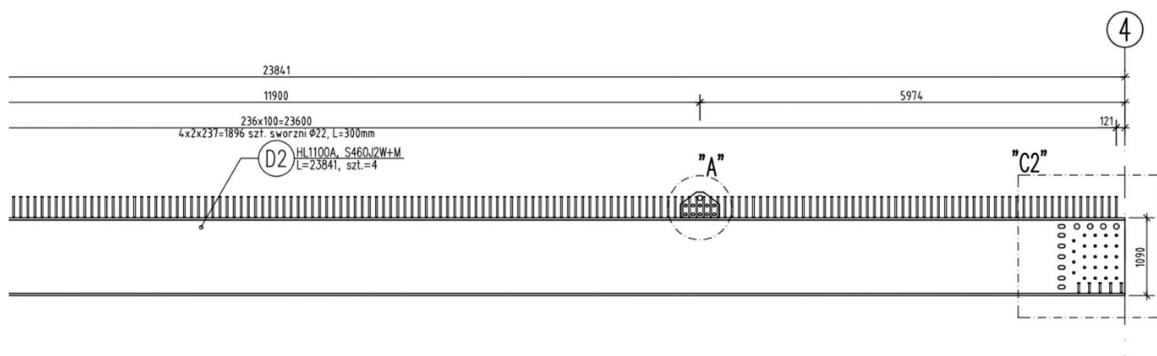
Rys. 36 Przekrój poprzeczny w strefie przęsłowej mostu M3 w Żaganiu



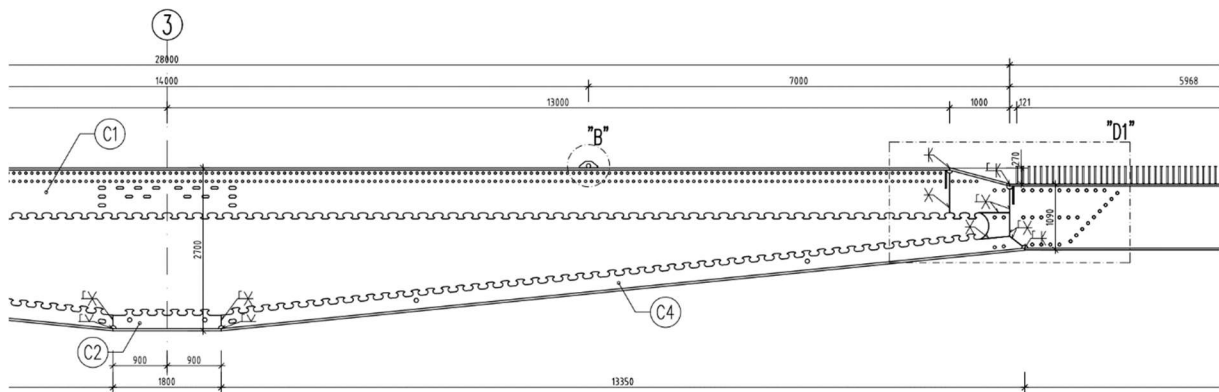
Rys. 37 Przekrój poprzeczny w strefie podpory pośredniej mostu M3 w Żaganiu



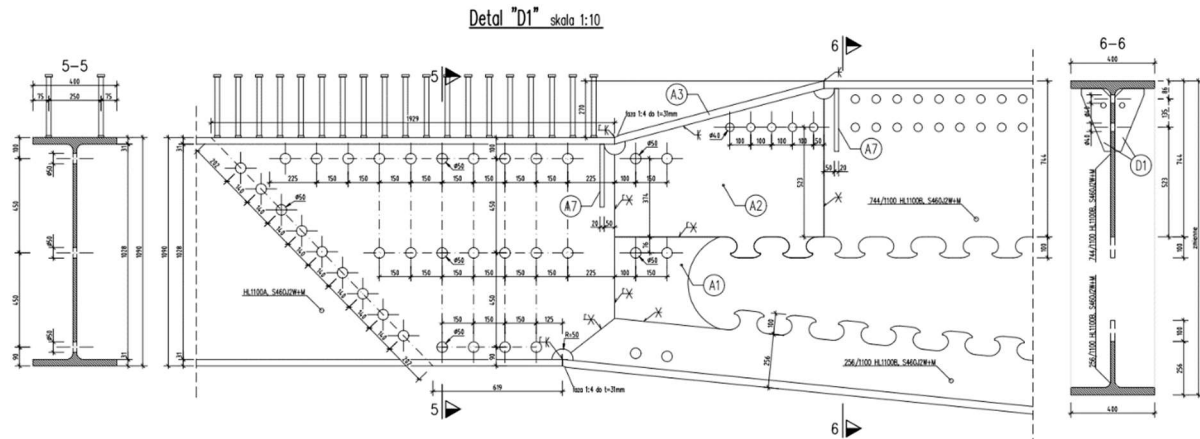
Rys. 38 Fragment rysunku zbrojenia dźwigara „Krokodyl” mostu M3 w Żaganiu



Rys. 39 Fragment rysunku konstrukcji stalowej – widoczna strefa przęsłowa



Rys. 40 Fragment rysunku konstrukcji stalowej – widoczna strefa podporowa



Rys. 41 Fragment rysunku konstrukcji stalowej – widoczna strefa przejściowa między częścią przęsłową i podporową

Wybrane rysunki projektu wykonawczego przedstawiające konstrukcję przedmiotowego mostu znajdują się w zał. 6.

Obecnie przedmiotowy most jest w fazie realizacji. Poniżej przedstawiam kilka zdjęć z etapu realizacji obiektu:



Rys. 42 Fragment konstrukcji stalowej – widoczna część dolna strefy podporowej



Rys. 43 Fragment konstrukcji stalowej – widoczna część górna strefy podporowej



Rys. 44 Przesło skrajne i część strefy podporowej podczas realizacji obiektu



Rys. 45 Miejsce łączenia dźwigara walcowanego ze strefy przesłowej z częścią podporową (dźwigar „Krokodyl” zabetonowany do poziomu pod teownik górny)



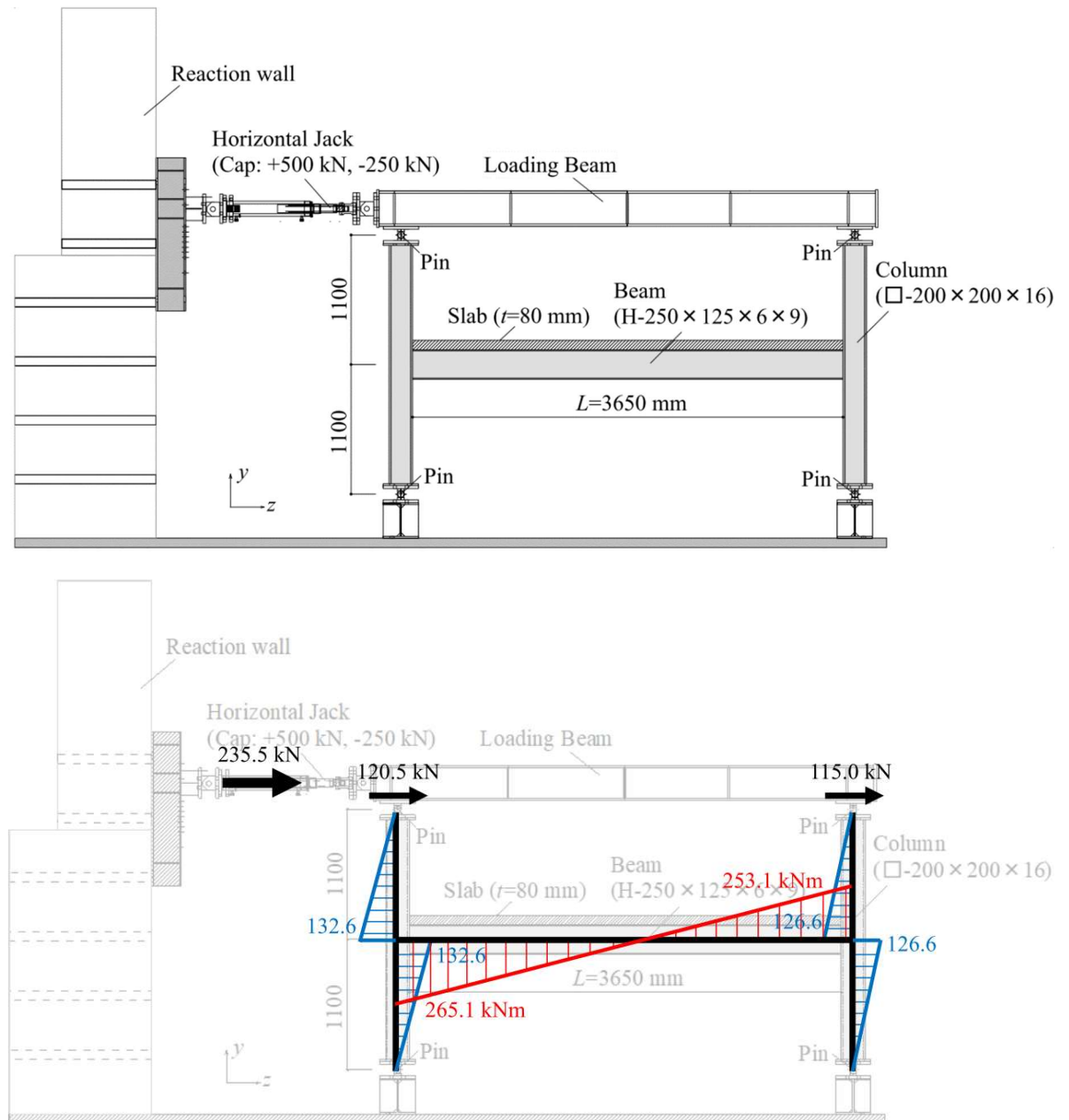
Rys. 46 Strefa podporowa mostu (dźwigar „Krokodyl” zabetonowany do poziomu pod teownik górny)

5 INFORMACJA O WYKAZYWANIU SIĘ ISTOTNĄ AKTYWNOŚCIĄ NAUKOWĄ ALBO ARTYSTYCZNĄ REALIZOWANĄ W WIECEJ NIŻ JEDNEJ UCZELNI, INSTYTUCJI NAUKOWEJ LUB INSTYTUCJI KULTURY, W SZCZEGÓLNOŚCI ZAGRANICZNEJ

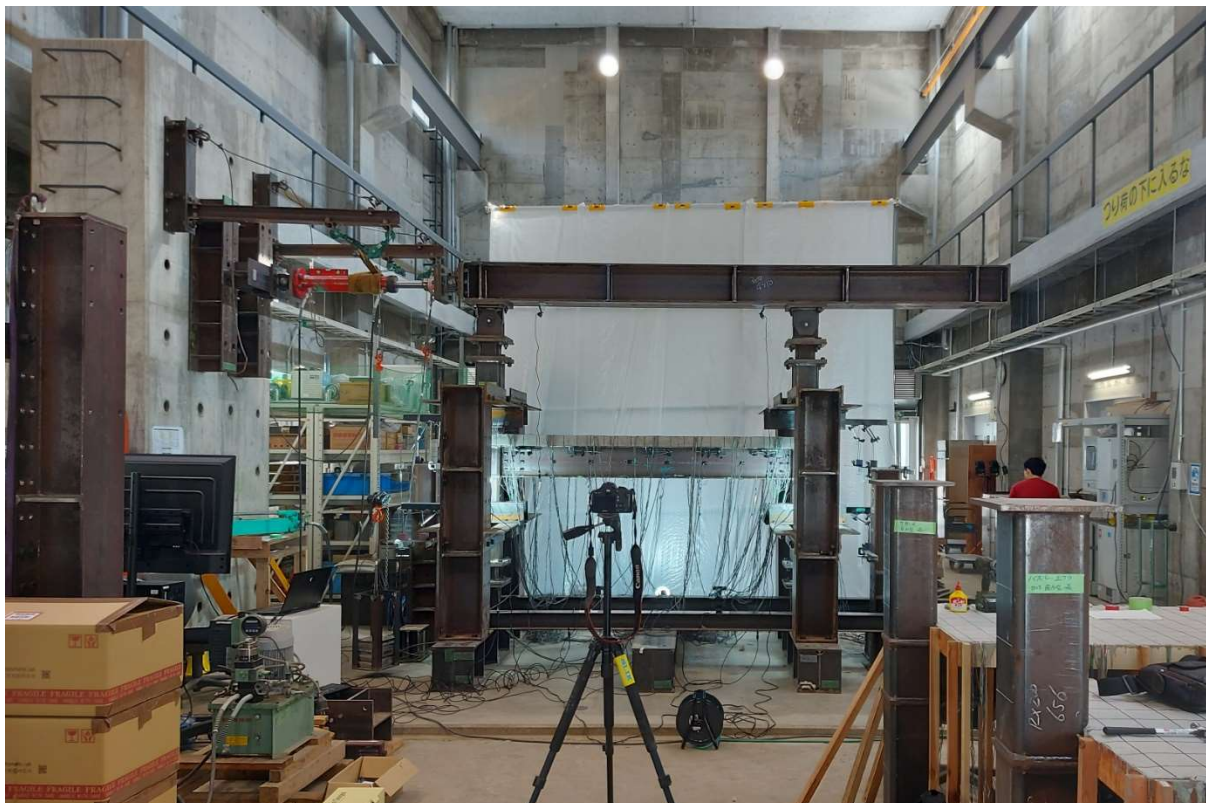
5.1 Współpraca z Tohoku University (Japonia)

Okres współpracy: 04.2022 – obecnie

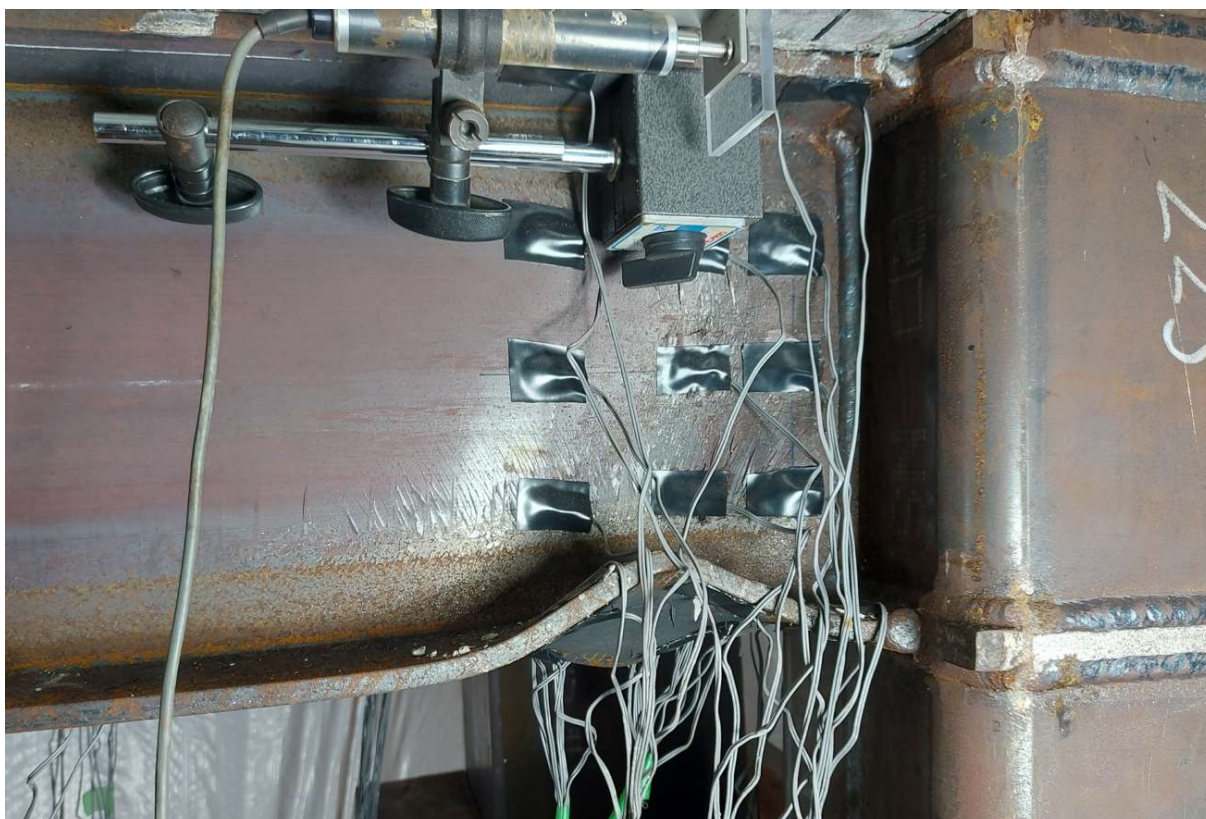
Współpraca w ramach wspólnie realizowanego projektu badawczego „*Establishment of integrated Japanese-European seismic performance evaluation method for high stiffness and strength composite building structures utilizing potential capacity of concrete slab*”. W projekcie tym uczestniczę od etapu składania wniosku o finansowanie projektu do Kashima Science Foundation, poprzez udział w planowaniu badań, ich realizację – też osobisty staż w Tohoku University – patrz dalej, aż do opracowywania wyników badań (projekt w toku). W ramach projektu badane są: belka stalowa (referencyjna), belki zespolone stalowo – betonowe z tradycyjnym zespoleniem sworzniami i różnymi stopniami zbrojenia płyty betonowej, a także z zespoleniem typu *composite dowels*, realizowanym wariantowo jako listwa z łącznikami (w tym przypadku) o kształcie PZ (*puzzle shape*) spawana do półki górnej dwuteownika stalowego, lub jako tzw. belka *precobeam*, w którym brak jest pasa górnego, a zespolenie utworzone jest przez rozcięcie środnika stalowego w ten sposób, aby uzyskać pożądaną kształt łączników (w tym przypadku) PZ. Doświadczenie w zakresie konstrukcji zespolonych, szczególnie w powiązaniu z doświadczeniem w zakresie łączników typu *composite dowels*, skutkowało zaproszeniem do udziału w niniejszym projekcie badawczym. Realizowane badania polegają na naprzemiennym obciążaniu siłą poziomą o zmiennym znaku sztywnej ramy typu H, w której rygiel stanowi badana belka zespolona. Siła stopniowo zwiększana prowadzi do wprowadzenia w badany element coraz większych odkształceń plastycznych, aż do wyczerpania jego nośności (pomimo umocnienia materiałowego związanego ze wzrostem odkształceń element jest w stanie przetrwać coraz mniejszą siłą zewnętrzną). Poniżej przedstawiono poglądowo plan badań oraz jedną z belek w czasie badania.



Rys. 47 Schemat stanowiska badawczego w realizowanym projekcie badawczym oraz układ sił i momentów (wartości z jednego z planowanych kroków obciążenia) w czasie badania



Rys. 48 Jedna z belek zespolonych w czasie badania



Rys. 49 Belka zespolona po badaniu (widoczne zniszczenie przez lokalną utratę stateczności pasa ściskanego klasy 1. przy bardzo dużych odkształceniach plastycznych, po naprzemiennym cyklu obciążeń)

5.2 Staż badawczo – dydaktyczny w Osaka Institute of Technology (Japonia)

Okres stażu: 04.12.2023 – 18.12.2023 r.

Staż na zaproszenie Prof. Dr. Osamu Ohyama oraz Ass. Prof. Yusuke Imagawa. W czasie stażu brałem udział w badaniach nowego typu zespolenia w belkach stalowo – betonowych (łąznik listwowy ze specjalnie uźebrowanego płaskownika spawanego do pasa górnego belki stalowej) w ramach projektu „*Loading test of a steel and concrete composite girder with special ribbed strip shear connection*”, prowadziłem gościnnie wykłady dla studentów dot. konstrukcji zespolonych stalowo – betonowych, a także dla przedstawicieli japońskich firm projektowych i wykonawczych oraz przedstawicieli administracji publicznej (Ota Ward Government Office w Tokyو) – potwierdzenie odbycia stażu w zał. 7.



Rys. 50 Wnioskodawca podczas jednego z wykładów prowadzonych w Osaka Institute of Technology



Rys. 51 Wnioskodawca podczas badań niszczących belkę zespoloną z zespoleniem za pomocą listwy z wytłaczanym uźbrowaniem (opis w tekście)

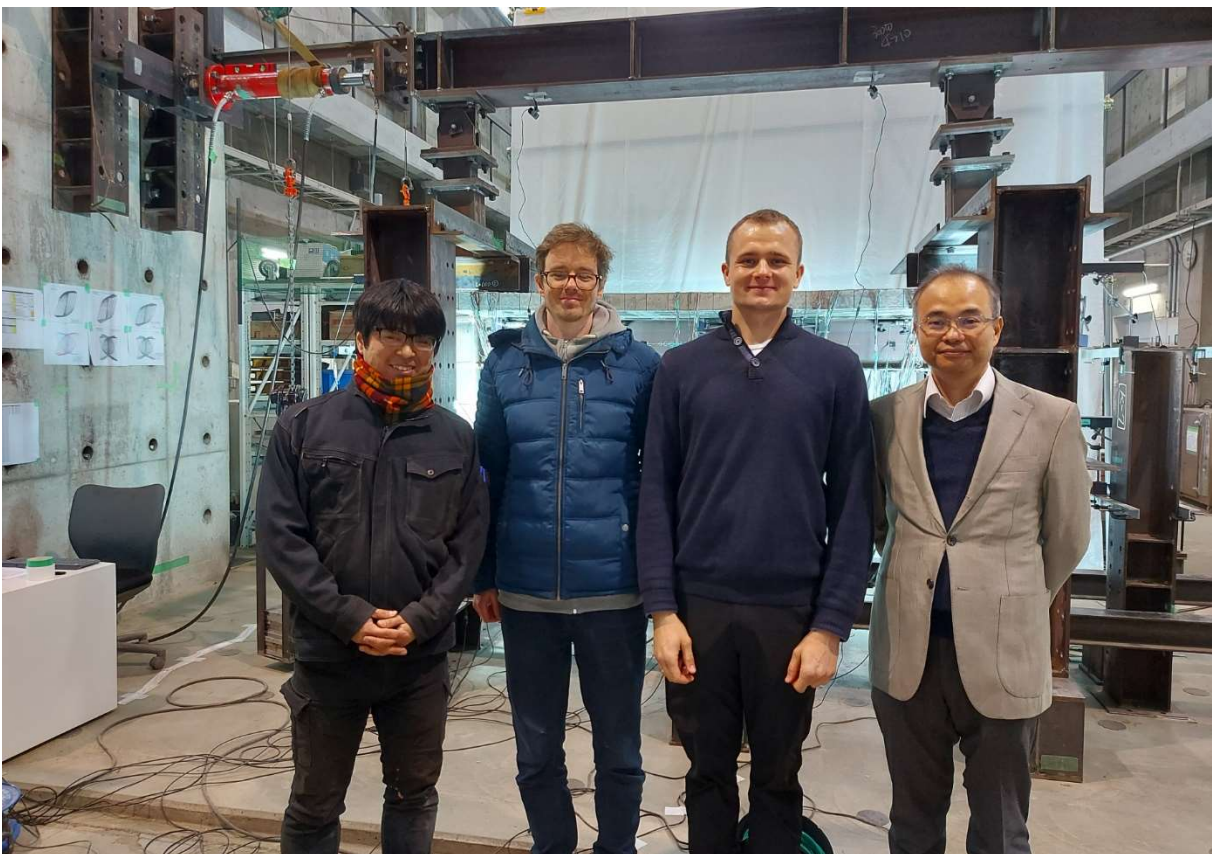
5.3 Staż badawczo – dydaktyczny w Tohoku University (Japonia)

Okres stażu: 18.11.2023 – 04.12.2023 r.

Staż na zaproszenie Prof. Dr. Yoshihiro Kimura oraz Dr. Atsushi Suzuki. W ramach stażu brałem udział jako oficjalny wykonawca w realizacji badań w ramach projektu „*Establishment of integrated Japanese-European seismic performance evaluation method for high stiffness and strength composite building structures utilizing potential capacity of concrete slab*” – opisane szerzej w podpunkcie a. W czasie stażu prowadziłem też wykłady dla studentów dot. konstrukcji zespolonych stalowo – betonowych, a także dla przedstawicieli japońskich firm projektowych i wykonawczych – potwierdzenie odbycia stażu w zał. 8.



Rys. 52 Wnioskodawca podczas jednego z wykładów na Tohoku University



Rys. 53 Wnioskodawca podczas badań niszczących w ramach realizowanego projektu razem z Dr. Atsushi Suzuki, Prof. Yoshihiro Kimura i Dr. Piotrem Koziółem (opis w tekście)

5.4 Współpraca z różnymi ośrodkami zagranicznymi

Okres współpracy: 2007 – obecnie

Ośrodki zagraniczne: m.in.: RWTH Aachen (Niemcy), Universität der Bundeswehr München (Niemcy), SETRA (Francja), SSF Ingenieure GmbH (Niemcy), Université de Liège (Belgia), Ramböll Sverige AB (Szwecja), Luleå University of Technology (Szwecja), ArcelorMittal (Luksemburg) i inne

Współpraca w ramach udziału we wspólnych projektach (głównie projekty RFCS), badaniach, wdrożeniach technologicznych, udziałach w konferencjach i publikacjach naukowo – technicznych. Wykaz zrealizowanych jako wykonawca projektów badawczych, wykaz udziału w wybranych konferencjach i wykaz publikacji naukowych znajduje się w części zał. 4 wniosku pt. „Wykaz osiągnięć naukowych albo artystycznych, stanowiących znaczny wkład w rozwój określonej dyscypliny”. Poniżej przedstawiłem wycinki ze stron tytułowych raportów końcowych zrealizowanych projektów RFCS (Precobeam, ELEM, Preco+), na których widać moje nazwisko jako współautora raportu oraz listę instytucji zagranicznych, z którymi współpracowałem w ramach projektu. Pełne treści raportów końcowych załączam w części cyfrowej wniosku. W ramach tych projektów opracowywane było zespolenie typu *composite dowels*, od samego pomysłu do opracowania pierwszych wytycznych projektowych.

European Commission

Research Fund for Coal and Steel

Prefabricated enduring composite beams based on innovative shear transmission (Preco-Beam)

G. Seidl, E. Viefhues

SSF Ingenieure AG,

Leopoldstraße 208, 80804 München, GERMANY (SSF)

J. Berthelley

Service d'Étude Technique des Routes et Autoroutes,

Avenue Aristide Briand 46 BP 100, 92223 Bagneux, FRANCE (SETRA)

I. Mangerig, R. Wagner

Universität der Bundeswehr München,

Werner Heisenberg Weg 39, 85577 Neubiberg, GERMANY (UBWM)

W. Lorenc, M. Kozuch

Politechnica Wroclawska,

Wybrzeze st. Wyspianskiego 27, 50370 Wroclaw, POLAND (TUWRO)

J.-M. Franssen, D. Janssen

Université de Liège,

Plac du 20 Aout 7, 4000 Liège, BELGIUM (ULGG)

J. Ikäheimonen, R. Lundmark

RamböllSverige AB,

PO Box 4205, 102 65 Stockholm, SWEDEN (RAMBSV)

O. Hechler, N. Popa

Arcelor Profil Luxembourg S.A.,

rue du Luxembourg 66, 4009 Esch-sur-Alzette, LUXEMBOURG (Arcelor)

Grant Agreement RFSR-CT-2006-00030

1 July 2006 to 30 June 2009

Final report

Directorate-General for Research and Innovation

2013

EUR 25321 EN

Rys. 54 Strona z raportu Preco-Beam – widoczne nazwiska autorów (w tym M. Kozuch) oraz afiliacje (jako wykaz zagranicznych instytucji, z którymi wnioskodawca współpracuje)

European Commission

Research Fund for Coal and Steel

Composite bridges with prefabricated decks (ELEM)

M. Feldmann, F. Möller, S. Möller
Rheinisch Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH)
Mies-van-der-Rohe-Straße 1, 52074 Aachen, GERMANY

P. Collin, R. Hällmark, O. Kerokoski
Ramböll Sverige AB (Ramböll)
Box 850, 971 26 Luleå, SWEDEN

M. Kożuch, W. Lorenc, S. Rowiński
Wrocław University of Technology (PWr)
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, POLAND

P. Collin, R. Hällmark, M. Nilsson, L. Åström
Luleå University of Technology (LTU)
Universitetsområdet, Porsön 971 87 Luleå, SWEDEN

B. Norlin
KTH - Royal Institute of Technology (KTH)
Brinellvägen 23, 100 44 Stockholm, SWEDEN

G. Seidl, T. Hehne, O. Hoyer, M. Stambuk
SSF Ingenieure AG (SSF)
Domagkstraße 1a, 80807 München, GERMANY

T. Harju
Rautaruukki Oyj, Ruukki Construction (Ruukki)
Harviaalantie 420, FI-13300 Hämeenlinna, FINLAND

Grant Agreement RFSR-CT-2008-00039
1 July 2008 to 30 June 2011


Final report

Directorate-General for Research and Innovation

2013

EUR 25897 EN

Rys. 55 Strona z raportu Elem – widoczne nazwiska autorów (w tym M. Kożuch) oraz afiliacje (jako wykaz zagranicznych instytucji, z którymi wnioskodawca współpracuje)

		RFCS RFS2 - CT - 2011 - 00026 Preco+	SSF Ingenieure AG ArcelorMittal Belval & Differdange Politechnika Wroclawska Université de Liège Acciona S.A. Ramböll Sverige AB FOSTA
<h1 style="margin: 0;">Design Guide</h1>			
	 <p data-bbox="347 994 740 1055">Prefabricated Enduring Composite Beams based on innovative Shear Transmission</p>		<p>Preface</p> <p>This design manual is an outcome of the research project RFCS-CT-2006-00030 PrecoBeam "Prefabricated Enduring Composite Beams based on innovative Shear Transmission" (Seidl G., et al., 2010) and the successive dissemination project RFS2-CT-2011-00026 Preco+ "Prefabricated Enduring Composite Beams based on innovative Shear Transmission" (Seidl G., et al., 2012) which have been co-funded by the Research Fund for Coal and Steel (RFCS) of the European Community.</p> <p>Within the RFCS research project essential knowledge has been acquired to enhance the competitiveness of steel and composite bridges with external reinforcement elements (PrecoBeam technology) and this has been incorporated in the design manual at hand which has been also presented in the frame of several seminars and workshops.</p> <p>The authors of this design manual gratefully acknowledge the support and financial grant of the Research Fund for Coal and Steel (RFCS) of the European Community.</p> <p>Günter Seidl, Oliver Hoyer SSF Ingenieure AG, (SSF)</p> <p>Riccardo Zanon, Nicoleta Popa ArcelorMittal Belval & Differdange (AM R&D)</p> <p>Wojciech Lorenc, Sławomir Rowiński, Maciej Kożuch Wrocław University of Technology; Institute of Building Engineering (PWr)</p> <p>Jean-Marc Franssen, Thibault Fohn University of Liège; Department ArGenCo (ULg)</p> <p>Juliana Patino Quinchia, Carlo Hermosilla Carrasco Acciona Infrastructures S.A. (Acc)</p> <p>Ali Farhang Ramböll Sweden AB (Ram)</p> <p>Gregor Nüsse Research Association for Steel Application (FOSTA)</p> <p>The authors would like to thank the further project partners of the original project PrecoBeam "Prefabricated Enduring Composite Beams based on innovative Shear Transmission" for their technical contribution to this design guide. In particular thanks to</p> <p>Jacques Berthelémy SETRA, Division des grands ouvrages et de l'innovation</p> <p>Prof. Dr.-Ing. Ingbert Mangerig Universität der Bundeswehr München, Lehrstuhl für Stahlbau</p>
	26.03.2013		

Rys. 56 Strona z raportu Preco+ (Design Guide) – widoczne nazwiska autorów (w tym M. Kożuch) oraz afiliacje (jako wykaz zagranicznych instytucji, z którymi wnioskodawca współpracuje)

Dodatkowo jako wykonawca (zatrudniony w kategorii Naukowiec) brałem też udział w projekcie ECOBRIDGE „Demonstration of ECONomical BRIDGE solutions based on innovative composite dowels and integrated abutments” (kontrakt nr RFSP-CT-2010-00024), ale nie byłem autorem raportu końcowego.

European Commission

Research Fund for Coal and Steel

Demonstration of economical bridge solutions based on innovative composite dowels and integrated abutments (ECOBIDGE)

N. Popa

ArcelorMittal Belval & Differdange S.A
66, rue de Luxembourg, 4009 Esch-sur-Alzette, Luxembourg

D. Pak, N. Schillo

RWTH Aachen University
Mies-van-der-Rohe-Str. 1, 52074 Aachen, Germany

G. Seidl

SSF Ingenieure GmbH
Schönhauser Allee 149, 10435 Berlin, Germany

M. Scherpe

TWT Sanierungsgesellschaft
Dorfstraße 10a, 04758 Cavertitz / Sörnewitz, Germany

R. Bancila

Universitatea "Politehnica"
Piata Victoriei nr. 2, 300006 Timisoara, Romania

E. Petzek

SSF-RO Ltd
Str. T. Vladimirescu No. 12, 300195 Timisoara, Romania

W. Lorenc

Wrocław University of Technology
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50370 Wrocław, Poland

K. Charszla, J. Piwoński

Europrojekt Gdańsk Sp. z o.o.
Nadwiślańska 55, 80680 Gdańsk, Poland

P. Arabczyk, P. Bartoszewski

Energopol – Szczecin Spółka Akcyjna
Św. Floriana 9/13, 706460 Szczecin, PolandGrant Agreement RFSP-CT-2010-00024
1 July 2010 to 31 December 2013

Final report

Directorate-General for Research and Innovation

2015

EUR 27186 EN

Rys. 57 Strona z raportu Ecobridge – widoczne zagraniczne instytucje, z którymi wnioskodawca współpracuje

Poza tym w latach 2019 – 2021 brałem też udział jako wykonawca (zatrudniony w kategorii Naukowiec / Nauczyciel) w realizacji projektu CAVA Eurocodes: Digitalization in Construction, Computer-based Design for Structural Elements - Analyses and Validation of Compliance to EuroCodes, Erasmus+, w ramach którego opracowałem wspólnie z zespołem rozdział: Basic numerical methods for buckling analysis (swayed single- and multistorey frames – 2d /

3d) oraz Composite bridge using double composite action: two different design approaches using FE.



Digitalization in Construction, Computer-based Design for Structural Elements - Analyses and Validation of Compliance to EuroCodes

Project Coordinators

Prof. Dr.-Ing. Markus Schäfer, University of Luxembourg

Prof. Dr.-Ing. Michél Bender, Trier University of Applied Sciences

Prof. Dr.-Ing. Wolfhard Zahlten, University of Wuppertal

Dr.-Ing. Piotr Koziol, Prof. Dr.-Ing Lorenc Wojciech, Wrocław University of Science and Technology



Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union



Erasmus+

August 2021

Rys. 58 Strona z raportu CAVA Eurocodes – widoczne zagraniczne instytucje, z którymi wnioskodawca współpracuje

**Example 4.2.2****BASIC NUMERICAL METHODS FOR BUCKLING
ANALYSIS (SWAYED SINGLE- AND MULTISTOREY
FRAMES – 2D / 3D)**

Authors: Łukasz Skrzętkowicz, Maciej Kożuch,

Wojciech Lorenc, Piotr Koziol

Corresponding University: Wrocław University of Science and Technology

Date

14/06/2021

Example 4.3.12**COMPOSITE BRIDGE USING DOUBLE COMPOSITE ACTION:****TWO DIFFERENT DESIGN APPROACHES USING FE**

Authors: Wojciech Lorenc, Maciej Kożuch, Łukasz Skrzętkowicz

Corresponding University: Wrocław University of Science and Technology

Date

16/07/2021

Rys. 59 Strony tytułowe z 2 rozdziałów raportu CAVA Eurocodes opracowane przez wnioskodawcę razem z zespołem

5.5 Współpraca z działem R&D ArcelorMittal (Luksemburg)

Okres współpracy: 2014 – obecnie

W ramach współpracy zrealizowałem m.in. 5 projektów badawczo – rozwojowych:

- A. **Innovative design of composite bridges for medium spans based on rolled sections**, M. Kożuch, W.Lorenc, 2016, dostępne online:
https://sections.arcelormittal.com/repository2/Sections/3_Innovative_design_Tandem_solution_AM.pdf - projekt zakończony bezpośrednim wdrożeniem (most w ciągu ul. Niemodlińskiej w Opolu), a następnie po modyfikacjach kolejne aplikacje w projektowanych mostach,

- B. **Measurement of residual stresses using the hole-drilling method**, M. Kożuch, W. Lorenc, S. Rowiński, K. Marcinczak, 2017,
- C. **Development of a competitive composite bridge solution for road bridges with spans between 60 m and 100 m based on rolled sections**, M. Kożuch, W. Lorenc, 2017,
- D. **Method of cold bending of ½ HD sections**, M. Kożuch, W. Lorenc, 2018,
- E. **Report on the R&D works on the topic of plastic hinge behaviour and practical application of plastic or nonlinear design for cross-sectional resistance in steel-concrete composite bridges**, M. Kożuch, W. Lorenc, K. Marcinczak, 2022.

6 INFORMACJA O OSIĄGNIĘCIACH DYDAKTYCZNYCH, ORGANIZACYJNYCH ORAZ POPULARYZUJĄCYCH NAUKĘ LUB SZTUKĘ

6.1 Osiągnięcia dydaktyczne

Wieloletnie doświadczenie w prowadzeniu zajęć dydaktycznych na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej, w tym opracowanie treści programowych wybranych kursów (zaznaczone poniżej). Lista prowadzonych cyklicznie kursów dydaktycznych (nie wyszczególniano kursów realizowanych nieregularnie):

- **Konstrukcje metalowe – podstawy**: wykład i laboratorium, w tym opracowanie treści programowych jako opiekun kursu,
- **Konstrukcje metalowe – elementy i hale**: projekt,
- **Konstrukcje metalowe – obiekty**: projekt,
- **Konstrukcje metalowe – specjalne**: laboratorium,
- **Konstrukcje zespolone – podstawy**: wykład i seminarium, w tym opracowanie treści programowych jako opiekun kursu,
- **Konstrukcje zespolone**: wykład i projekt,
- **Hybrydowe konstrukcje stalowo – betonowe**: wykład i projekt, w tym opracowanie treści programowych,
- **Metal structures**: projekt.

Dodatkowo prowadzenie wykładów w ramach programu Master Erasmus Mundus STRAINS w lipcu 2022 oraz cyklu wykładów w ramach współpracy z Idea Statica (gościnne wystąpienia z zamawianym referatem na seminariach w Katowicach, Krakowie, Poznaniu, Warszawie, Wrocławiu).

Jestem promotorem 51 prac dyplomowych, w tym ok. 27 prac inżynierskich oraz 24 prac magisterskich (w tym też na anglojęzycznej specjalności *Civil Engineering*). W ramach

zrealizowanych przez moich dyplomantów prac magisterskich 2 z nich zdobyły pierwszą nagrodę w konkursach na najlepsze prace dyplomowe, tj.:

- D. Figura, „Zadaszenie trybun obiektów sportowych” – I miejsce w konkursie na najlepszą pracę dyplomową magisterską opracowaną w 2022/2023 na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej organizowanym przez Wrocławski Oddział PZiTb,
- M. Surma, „Walcowe naziemne zbiorniki na paliwa płynne” – nagroda Przewodniczącego Dolnośląskiej Okręgowej Izby Inżynierów Budownictwa w konkursie Constructor Temporis Futuri.

Byłem promotorem pomocniczym w zrealizowanej (obronionej) pracy doktorskiej dr. inż. Piotra Koziola pt. „Nośność łączników stalowych w strefie połączenia elementu zespolonego z elementem betonowym” – raport serii PRE nr 3/2018, kwiecień 2018.

Obecnie jestem promotorem pomocniczym w aktualnie realizowanym przewodzie doktorskim mgr. inż. Łukasza Skrętkowicza (na temat wpływu imperfekcji na stateczność konstrukcji mostów typu network-arch).

6.2 Osiągnięcia organizacyjne

Udział w pracach w ramach komitetu organizacyjnego, naukowego i/lub programowego następujących konferencji naukowych:

- International Conference on Metal Structures “Progress in steel and composite structures”, Wrocław, 2011 – komitet organizacyjny,
- Seminarium Naukowo-Techniczne Wrocławskie Dni Mostowe "Bezpieczeństwo budowli mostowych", 25-26 listopada 2021, Wrocław – komitet programowy,
- Seminarium Naukowo-Techniczne Wrocławskie Dni Mostowe "Wyzwania współczesnego mostownictwa", 24-25 listopada 2022, Wrocław – komitet programowy,
- Seminarium Naukowo-Techniczne Wrocławskie Dni Mostowe "Obiekty kolejowe", 23-24 listopada 2023, Wrocław – komitet programowy,
- Seminarium Naukowo-Techniczne Wrocławskie Dni Mostowe "Diagnostyka i utrzymanie obiektów mostowych", 21-22 listopada 2024, Wrocław (obecnie w przygotowaniu) – komitet programowy,
- International Conference on Metal Structures, Wrocław, 2025 (obecnie w przygotowaniu) – komitet naukowy.

W 2012 we współpracy z firmą ArcelorMittal brałem udział w zadaniu polegającym na dostarczeniu do Akredytowanego Laboratorium ówczesnego Instytutu Budownictwa (aktualnie Katedry Konstrukcji Budowlanych) nowego stanowiska badawczego (ramy stalowej) o nośności do 10 MN. W ramach wykonanych prac w zespole razem z W. Lorencem i S. Rowińskim byłem odpowiedzialny za zaprojektowanie ramy (konstrukcja o nośności do 10 MN,

przewidziana też do realizacji badań zmęczeniowych, z regulowaną wysokością i długością dostosowaną do gabarytów badanych elementów, niewymagająca kotwienia w fundamencie – z „zamkniętym” układem sił). Po zaprojektowaniu ramy przeprowadziłem całą procedurę formalną umożliwiającą dostarczenie i przyjęcie na stan stanowiska badawczego.

Współorganizacja wycieczek dydaktycznych dla studentów i pracowników Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego, w tym m.in. do:

- Huty Stali Katowice w Dąbrowie Górniczej, 2013, 2015,
- zakładu prefabrykacji konstrukcji betonowych BETARD w Długołęce, 2022,
- huty stali w Belval & Differdange, Luksemburg, 2016, 2018.

Współorganizacja oraz opieka nad studentami podczas Wiosennego Rajdu Budowlańca 2017 w Głucholazach (cykliczna impreza dla studentów Budownictwa Lądowego i Wodnego PWr.).

W ramach prac eksperckich realizowanych na Politechnice Wrocławskiej dla innych podmiotów gospodarczych zorganizowałem i przeprowadziłem w Laboratorium Katedry Konstrukcji Budowlanych badania różnych elementów budowlanych, prace zakończone powstaniem 3 raportów typu U (usługowe dla przemysłu), 8 raportów SPR (wyniki naukowych prac badawczych i studyjnych) oraz 2 raporty PRE (wyniki prac naukowych przeznaczonych do opublikowania).

6.3 Osiągnięcia popularyzujące naukę

Aktywność wnioskodawcy w popularyzowaniu nauki:

- stworzenie dwóch tutoriali (filmów edukacyjnych) pt. Modelowanie stropu zespolonego stalowo-betonowego oraz Analiza stropu zespolonego stalowo-betonowego dostępnych on-line, wykonanych w ramach projektu e-science+.pl AZON (Fundusze Europejskie, Polska Cyfrowa, Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego), 2018
- autorstwo lub współautorstwo wielu publikacji naukowych (wykaz w zał. 4 wniosku), spośród których wiele dostępnych jest on-line w różnych serwisach internetowych,
- prowadzenie zajęć w ramach Master Erasmus Mundus STRAINS, 2022,
- na zaproszenie organizatora wygłoszenie wykładu zamawianego na Seminarium „Bezpieczeństwo budowy mostowych” – Workshop: „Problemy prawno-projektowe rehabilitacji starych mostów kolejowych”, 2021,
- wygłaszanie wykładów popularyzacyjnych dot. projektowania belek zespolonych typu Preco-beam w Berlinie, Sztokholmie i Wrocławiu (w ramach projektu Preco+),
- opracowanie materiałów dydaktycznych w ramach realizacji projektu CAVA Eurocodes Digitalization in Construction, Computer-based Design for Structural Elements - Analyses and Validation of Compliance to EuroCodes, Erasmus+, 2019-2021, w tym przede wszystkim opracowanie rozdziałów: Basic numerical methods for buckling

analysis (swayed single- and multistorey frames – 2d / 3d) oraz Composite bridge using double composite action: two different design approaches using FE,

- opieka merytoryczna nad studenckimi artykułami naukowymi, w tym dyplom w I edycji „Konkursu na najlepszy artykuł o tematyce budowlanej” organizowanego przez Koło nr 1 PZiTb przy Politechnice Wrocławskiej pod patronatem PWr i Przeglądu Budowlanego.

7 INNE INFORMACJE DOTYCZĄCE KARIERY ZAWODOWEJ

Ważne informacje, osiągnięcia, nagrody związane z przebiegiem kariery zawodowej:

- 2005 – Dyplom Honorowy Rektora za znaczące osiągnięcia w działalności społecznej wśród studentów i na chwałę Uczelni,
- 2006 – Dyplom Nagrody Rektora za znaczące osiągnięcia w działalności społecznej wśród studentów i na chwałę Uczelni,
- 2008 – wyróżnienie Przewodniczącego DOIIB w konkursie *Constructor Temporis Futuri* za magisterską pracę dyplomową,
- 2008 – nagroda dla najlepszego absolwenta Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej w roku akademickim 2007/2008,
- **2013 – uzyskanie uprawnień budowlanych do projektowania bez ograniczeń w specjalności mostowej (nr uprawnień 290/DOŚ/13),**
- 2014 – Nagroda Rektora w uznaniu wyróżniającego wkładu w działalność uczelni,
- 2015 – Nagroda Rektora w uznaniu wyróżniającego wkładu w działalność uczelni,
- 2017 – Nagroda Rektora w uznaniu wyróżniającego wkładu w działalność uczelni,
- 2019 – Nagroda Rektora w uznaniu wyróżniającego wkładu w działalność uczelni,
- 2020 – Nagroda Rektora w uznaniu wyróżniającego wkładu w działalność uczelni,
- 2021 – Nagroda Rektora w uznaniu wyróżniającego wkładu w działalność uczelni,
- 2021 – Nagroda za treść i formę przygotowania materiałów autorskich dla „Inżynierii i Budownictwa”,
- **2013 – obecnie – udział w funkcji projektanta lub sprawdzającego lub autora/współautora dokumentacji na potrzeby realizacji projektów budowlanych i/lub wykonawczych budowy, przebudowy lub remontu lub udział w opracowaniu ekspertyz, analiz i opinii dla ponad 80 obiektów (w tym 41 dla obiektów inżynierskich związanych z koleją tj. mosty kolejowe, przejścia pod torami, kładki nad torami, zabezpieczenia torowisk, itp., 37 dla mostów drogowych, technologicznych lub kładek dla pieszych, 8 dla obiektów kubaturowych lub budownictwa przemysłowego) – dokładny spis zrealizowanych zadań w zał. nr 4,**
- **2007 – obecnie – autor lub współautor ponad 100 analiz statycznych – wytrzymałościowych na potrzeby określenia nośności obiektów kolejowych lub drogowych (poza wyszczególnionymi powyżej), w których wnioskodawca nie pełnił samodzielnej funkcji technicznej w rozumieniu prawa budowlanego,**

- **udział w pracach zespołów eksperckich o dużym znaczeniu gospodarczym, m.in. przy wzmocnieniu wsporników want Mostu Uniwersyteckiego w Bydgoszczy i przy ocenie wytrzymałości stalowych konektorów konstrukcji dachu stadionu PGE Narodowego w Warszawie,**
- **2013 – obecnie – opracowanie projektów próbnych obciążeń ponad 100 obiektów mostowych.**



.....
(podpis wnioskodawcy)

8 BIBLIOGRAFIA

- [1] G. Seidl, E. Viefhues, J. Berthelley, I. Mangerig, R. Wagner, W. Lorenc, M. Kożuch, J.-M. Franssen, D. Janssen, J. Ikäheimonen, R. Lundmark, O. Hechler, N. Popa, Prefabricated enduring composite beams based on innovative shear transmission (Preco-Beam). RFSR-CT-2006-00030, Final report, EUR 25321 EN, 2013.
- [2] W. Lorenc, E. Kubica, M. Kożuch, Metody oceny wytrzymałości łączników w innowacyjnym zespoleniu belek stalowo – betonowych. V Sympozjon: Kompozyty, konstrukcje warstwowe, Wrocław 2009, DWE 2009, s. 33-34.
- [3] W. Lorenc, E. Kubica, M. Kożuch, Testing procedures in evaluation of resistance of innovative shear connection with composite dowels. Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2010, vol. 10, nr 3, s. 51-63.
- [4] P. Harnatkiewicz, A. Kopczyński, W. Lorenc, M. Kożuch, Koncepcja projektowania i szacowania trwałości zmęczeniowej belek zespolonych z połączeniem ścinanym typu Composite Dowels. Górnictwo odkrywkowe. 2010, R. 51, nr 4, s. 105-110.
- [5] W. Lorenc, E. Rusiński, E. Kubica, K. Rykaluk, A. Kopczyński, P. Harnatkiewicz, M. Kożuch, S. Rowiński, Nośność zmęczeniowa ciągłych łączników otwartych. Raporty Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej. 2011, seria SPR nr 19.
- [6] P. Harnatkiewicz, A. Kopczyński, M. Kożuch, W. Lorenc, S. Rowiński, Research on fatigue cracks in composite dowels shear connection. Engineering Failure Analysis. 2011, vol. 18, nr 5, s. 1279-1294.
- [7] S. Rowiński, M. Kożuch, Planowanie badań doświadczalnych konstrukcji zespolonych z ciągłymi łącznikami otwartymi. Interdyscyplinarność badań naukowych 2011, Oficyna wydawnicza PWr. 2011, s. 265-270.
- [8] W. Dudziński, G. Pękalski, P. Harnatkiewicz, A. Kopczyński, W. Lorenc, M. Kożuch, S. Rowiński, Study on fatigue cracks in steel-concrete shear connection with composite dowels. Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2011, vol. 11, nr 4, s. 839-858.
- [9] M. Kożuch, S. Rowiński, W. Lorenc, E. Kubica, Model zniszczenia łącznika w zespoleniu typu composite dowels. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska. 2012, z. 59, nr 3/II. S. 201-208.
- [10] S. Rowiński, M. Kożuch, Analizy numeryczne a badania doświadczalne na przykładzie łączników typu MCL w konstrukcjach zespolonych. Interdyscyplinarność badań naukowych 2012, Oficyna wydawnicza PWr. 2012, s. 401-404.
- [11] G. Seidl, O. Hoyer, R. Zanon, N. Popa, W. Lorenc, S. Rowiński, M. Kożuch, J.-M. Franssen, T. Fohn, J. Quinchia, C. Hermosilla, A. Farhang, G. Nüsse, Prefabrykowane trwałe belki zespolone z innowacyjnym połączeniem ścinanym: wytyczne do projektowania. Wrocław: Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2012. RFCS RFS2-CT-2011-00026 Preco+, Final report.
- [12] S. Rowiński, Wytrzymałość zmęczeniowa łącznika stalowego w innowacyjnym zespoleniu belki stalowo-betonowej. Raporty Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej. 2012, seria PRE nr 4.

- [13] M. Kożuch, Nośność stalowych łączników otwartych typu MCL w belkach zespolonych stalowo – betonowych. Raporty Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej. 2012, seria PRE nr 3.
- [14] G. Seidl, Verhalten und Tragfähigkeit von Verbunddübeln in Stahlbetonverbundträgern, Dissertation, Raport serii PRE nr. 4/2009, Technische Universität Breslau, 2009.
- [15] S. Heinemeyer, Zum Trag- und Verformungsverhalten von Verbundträgern aus ultrahochfestem Beton mit Verbundleisten. Dissertation, Institut für Massivbau, RWTH Aachen, Aachen, 2011.
- [16] FOSTA- Forschungsvorhaben P804: Neue Systeme für Stahlverbundbrücken – Verbundfertigteilträger aus hochfesten Werkstoffen und innovativen Verbundmitteln. Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V., gemeinsames Forschungsvorhaben des Lehrstuhls für Stahlbau und Leichtmetallbau und Instituts für Massivbau, beide RWTH Aachen und dem Ingenieurbüro SSF, München, Laufzeit: 3/2009-2/2011.
- [17] M. Claßen, Zum Trag- und Verformungsverhalten von Verbundträgern mit Verbunddübelleisten und großen Stegöffnungen, Fakultät für Bauingenieurwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Dissertation, 2016.
- [18] Kopp M. et al., Composite dowels as shear connectors for composite beams – Background to the design concept for static loading / Journal of Constructional Steel Research 147 (2018), 488–503.
- [19] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-26.4-56 Verbunddübelleisten, Deutsches Institut für Bautechnik.
- [20] prCEN/TS 1994-1-102:2024 Eurocode 4 – Design of composite steel and concrete structures – Part 1-102: Composite Dowels, Draft version.
- [21] M. Kożuch, W. Lorenc, S. Rowiński, Nowe stanowisko do badań niszczących w Instytucie Budownictwa Politechniki Wrocławskiej. Materiały Budowlane. 2013, nr 3, s. 64-65.
- [22] M. Feldmann, F. Möller, S. Möller, P. Collin, R. Hällmark, O. Kerokoski, M. Kożuch, W. Lorenc, S. Rowiński, P. Collin, R. Hällmark, M. Nilsson, L. Åström, B. Norlin, G. Seidl, T. Hehne, O. Hoyer, M. Stambuk, T. Harju, Composite bridges with prefabricated decks. 2013. RFSR-CT-2008-00039 ELEM, Final report.
- [23] W. Lorenc, M. Kożuch, G. Seidl, Zur Grenztragfähigkeit von Verbunddübeln mit Klothoidenform. Stahlbau. 2013, Jg. 82, H. 3, s. 196-207.
- [24] S. Rowiński, W. Lorenc, M. Kożuch, Study on fatigue cracks in steel - concrete shear connectors composite dowels MCL. Key Engineering Materials. 2014, vol. 598, s. 207-212.
- [25] W. Lorenc, M. Kożuch, S. Rowiński, The behaviour of puzzle-shaped composite dowels. Pt. 1, Experimental study. Journal of Constructional Steel Research. 2014, vol. 101, s. 482-499.
- [26] W. Lorenc, M. Kożuch, S. Rowiński, The behaviour of puzzle-shaped composite dowels. Pt. 2, Theoretical investigations. Journal of Constructional Steel Research. 2014, vol. 101, s. 500-518.
- [27] M. Kożuch, S. Rowiński, Elastic behaviour of the steel part of a shear connection with MCL composite dowels: design basis for serviceability and fatigue limit states. Steel Construction. 2016, vol. 9, nr 2, s. 107-114.

- [28] M. Kożuch, W. Lorenc, Stress concentration factors of shear connection by composite dowels with MCL shape. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2019, vol. 19, nr 1, s. 32-46.
- [29] M. Kożuch, W. Lorenc, The behaviour of clothoid-shaped composite dowels: experimental and numerical investigations. *Journal of Constructional Steel Research*. 2020, vol. 167, art. 105962, s. 1-18.
- [30] Lechner T., Zur Anwendung von Verbunddübeln in schlanken Verbundträgern aus ultrahochfestem Beton. Dissertation, Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt der Technischen Universität München, 2017,
- [31] Lechner, T., Seidl, G., Fischer, O., Lightweight Composite Beams Utilizing UHPC and Composite Dowels. Eleventh High Performance Concrete (11th HPC) & Second Concrete Innovation Conference (2nd CIC), 04.2017.
- [32] M. Kożuch, W. Lorenc, Development of the modified clothoidal (MCL) shape of composite dowels against the background of fatigue and technological issues. *Studia Geotechnica et Mechanica* (obecnie w druku).
- [33] F. Profico, R. Zanon, W. Lorenc, M. Kożuch, Influence of local effects of composite dowels shear connection on the design of longitudinal weld parallel to them. *Wyzwania współczesnego mostownictwa: Seminarium Naukowo-Techniczne Wrocławskie Dni Mostowe*, Wrocław, 2022. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, s. 221-228.
- [34] M. Kożuch, W. Lorenc, Analiza możliwości modyfikacji połączenia blachy z łącznikami MCL (gr. 30 mm) ze średnikiem stalowym belek CB (gr. 12 mm) pod kątem zastosowania spoin pachwinowych. *Pontes Sp. z o.o.*, 2022.
- [35] G. Bukała, A. Giergowicz, T. Kołakowski, W. Lorenc, Przebudowa mostu kolejowego z zastosowaniem przęseł VFT-WIB®. *Inżynieria i Budownictwo*. 2011, nr 4, s. 187-190.
- [36] G. Seidl, W. Lorenc, M. Kożuch, S. Rowiński, VFT-RAIL: nowa technologia budowy zespolonych przęseł mostów kolejowych na przykładzie przebudowy mostu Simmerbach w Niemczech. *Mosty (Katowice)*. 2013, nr 2, s. 48-54.
- [37] M. Kożuch, T. Kołakowski, W. Lorenc, E. Petzek, S. Rowiński, G. Seidl, Problem definicji przekroju zespolonego stalowo-betonowego na tle stosowanych obecnie w mostownictwie rozwiązań konstrukcyjnych. *Obiekty mostowe w infrastrukturze miejskiej. Wrocławskie Dni Mostowe*. Wrocław, 2013. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, s. 325-331.
- [38] W. Lorenc, Przenoszenie siły poprzecznej a definicja konstrukcji zespolonej, *Mosty*, 2011/6, s. 49.
- [39] M. Kożuch, Nośność na ścinanie poprzeczne belek zespolonych z dużym udziałem części stalowej i betonowej. *Raporty Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej*. 2015, Ser. SPR nr 28.
- [40] W. Lorenc, The model for a general composite section resulting from the introduction of composite dowel. *Steel Construction* 10 (2017), No. 2.
- [41] W. Lorenc, W. Kurz, G. Seidl, Hybrid steel – concrete sections for bridges: Definition and basis for design. *Engineering Structures* 270 (2022) 114902.
- [42] W. Lorenc, T. Kołakowski, A. Hukowicz, G. Seidl, Verbundbrücke bei Elbląg: Weiterentwicklung der VFT-WIB-Bauweise. *Stahlbau*. 2017. Jg. 86, H. 2, s. 167-174.

- [43] W. Lorenc, M. Kożuch, S. Balcerowiak, Wybrane zagadnienia modelowania przęseł mostów belkowych z dźwigarów zespolonych stalowo-betonowych. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2018.
- [44] M. Kożuch, Belki hybrydowe w mostach: definicja i koncepcja projektowania. Mosty, Tom nr 4 (2021).
- [45] M. Kożuch, Ł. Skrętkowicz, Proposal of concept for structural modelling of hybrid beams, *Studia Geotechnica et Mechanica*, 2022; 1–16.
- [46] M. Kożuch, Ł. Skrętkowicz, Proposal of concept for global analysis of hybrid beams - numerical investigation. *Archives of Civil Engineering*. 2023, vol. 69, nr 4, s. 205-226.
- [47] M. Kożuch, W. Lorenc, Innovative design of composite bridges for medium spans based on rolled sections. dostępne online: https://sections.arcelormittal.com/repository2/Sections/3_Innovative_design_Tandem_solution_AM.pdf
- [48] M. Kożuch, W. Lorenc, J. Rabięga, W. Ochojski, Technologia budowy mostu drogowego o rozpiętości przęsła powyżej 50 m z dźwigarów walcowanych. Mosty: przemiany w projektowaniu i technologiach budowy: Seminarium Naukowo-Techniczne Wrocławskie Dni Mostowe, Wrocław, 2017. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2017, s. 229-237.
- [49] M. Kożuch, W. Lorenc, J. Rabięga, W. Ochojski, Rozwój technologii budowy mostów o średniej i dużej rozpiętości przęseł z dźwigarów walcowanych. Mosty (Katowice). 2018, nr 2, s. 58-61.
- [50] D. Rademacher, W. Ochojski, W. Lorenc M. Kożuch, Advanced solutions with hot-rolled sections for economical and durable bridges. *Steel Construction*. 2018, vol. 11, nr 3, s. 196-204.
- [51] W. Lorenc M. Kożuch, D. Rademacher, W. Ochojski, Advanced solutions with hot-rolled sections for more economical bridges. 9th International Symposium on Steel Bridges, Prague, Czech Republic, 2018. IOP Publishing, 2018. art. 012016, s. 1-8.
- [52] R. Sęk, P. Wyrwas, Ł. Dzida, D. Tokarczyk, W. Ochojski, W. Lorenc, M. Kożuch, Przęsło z podwójnym zespoleniem o rozpiętości 68 m z zastosowaniem rozcinanych belek walcowanych. Mosty hybrydowe: Seminarium Naukowo-Techniczne Wrocławskie Dni Mostowe, 2018. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2018, s. 127-133.
- [53] D. Rademacher, W. Ochojski, W. Lorenc M. Kożuch, Profile gorącowalcowane : zaawansowane rozwiązania do budowy ekonomicznych i trwałych mostów. Cz. 1. Mosty (Katowice). 2018, nr 6, s. 58-61.
- [54] J. Kałuża, M. Kożuch, W. Lorenc, W. Ochojski, R. Sęk, D. Tokarczyk, P. Wyrwas, Przebudowa mostu przez San w Rzuchowie. *Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne*. 2019, nr 4, s. 96-98.
- [55] M. Kożuch, W. Lorenc, K. Marcinczak, Report on the R&D works on the topic of plastic hinge behaviour and practical application of plastic or nonlinear design for cross-sectional resistance in steel-concrete composite bridges, ArcelorMittal Report, 2022.
- [56] K. Marcinczak, M. Kożuch, W. Lorenc, R. Zanon, W. Ochojski, Uwiarygodnienie koncepcji "projektowania plastycznego" belek mostowych zgodnie z Eurokodem 4: badania niszczące w skali naturalnej zespolonych belek mostowych złożonych z dwuteownika HL1100 i płyty betonowej. Mosty (Katowice). 2023, nr 3, s. 25-28.

-
- [57] K. Marcinczak, M. Kozuch, W. Lorenc, K. Raduszkiewicz, R. Zanon, W. Ochojski, M. Tibolt, Plastic design of composite cross-sections for bridges made of rolled I-sections, Seminarium Naukowo-Techniczne Wrocławskie Dni Mostowe, Wrocław, 2023.
- [58] M. Kozuch, H. Windorpski, M. Struczyński, W. Ochojski, Mosty zespolone o konstrukcji Krokodyl o rozpiętości przęsła 50-60 m. Wyzwania współczesnego mostownictwa: Seminarium Naukowo-Techniczne Wrocławskie Dni Mostowe, Wrocław 2022. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2022. s. 203-210.
- [59] M. Kozuch, W. Lorenc, B. Bartoszek, A. Stempniewicz, H. Windorpski, M. Struczyński, R. Sęk, W. Ochojski, Application of rolled sections in composite bridges with span over 50 meters. Ce/papers (Ernst & Sohn GmbH.) 2023, vol. 6, nr 1, s. 518-529.