

# Metody wyznaczania nośności łączników zamkniętych typu perfobond



dr inż.  
**PIOTR KOZIOŁ**  
Politechnika Wrocławska  
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego  
ORCID:0000-0001-5205-1983

W artykule przedstawiono najczęściej stosowane metody wyznaczania nośności łączników typu perfobond. Omówiono podejście analityczne, wskazując na podstawowe i dodatkowe mechanizmy zniszczenia połączenia. Ponadto podsumowano doświadczalne sposoby wyznaczenia siły niszczącej.

**D**ynamiczny postęp w dziedzinie stalo-betonowych konstrukcji zespolonych sprawia, że są one szeroko stosowane w inżynierii mostowej oraz budownictwie kubaturowym. Łączniki zespalające część stalową z betonem pełnią kluczową rolę przy przenoszeniu ścinania oraz zapewnieniu ciągłości i współpracy całego przekroju poprzecznego przy przenoszeniu obciążeń. Spośród wielu różnych rozwiązań konstrukcyjnych, na uwagę zasługują łączniki zamknięte typu perfobond, charakteryzujące się wysoką nośnością, ciągliwością i odpornością zmęczeniową. Powstają one, gdy w elemencie stalowym wykonana zostanie grupa otworów, która po ułożeniu zbrojenia i zabetonowaniu zapobiega rozwarstwieniu w płaszczyźnie zespolenia (rys. 1).

Analizując różne sposoby wyznaczania nośności łączników zamkniętych typu perfobond wyróżnia się podejścia analityczne, półempiryczne lub doświadczalne. Najczęściej stosowane jest podejście półempiryczne, w którym nośność połączenia szacowana jest na podstawie populacji wyników szczegółowych. Wyniki te pozyskuje się, wykonując próbę czystego ścinania POST, badania niszczące elementów belkowych albo analizy numeryczne kalibrowane wynikami badań doświadczalnych. Niezależnie od metody wyznaczenia ścisłej nośności łącznika, kolejnym etapem jest obróbka statystyczna wyników, np. metodą regresji, w wyniku której otrzymuje się wzory na nośności połączenia.

Prezentowany tok postępowania zazwyczaj nie prowadzi do uogólnień ani zrozumienia zjawiska. Jest jednak przybliżeniem, które umożliwia szacowanie wyników z tym większą dokładnością, im bardziej trafnie zostaną zidentyfikowane parametry wejściowe. Celem artykułu jest omówienie sposobów określania

nośności łączników zamkniętych typu perfobond oraz analiza porównawcza wybranych wzorów analitycznych.

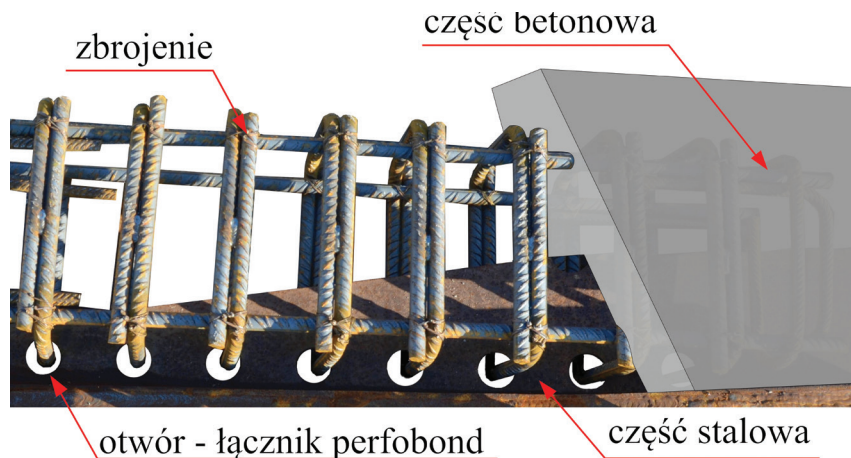
## Metody analityczne

W zależności od przyjętego podejścia badawczego wyróżnia się dwa podejścia analityczne do wyznaczania nośności tzw. łączników zamkniętych, czyli łączników typu perfobond. Pierwsze z nich polega na wyznaczeniu nośności pojedynczego łącznika rozumianej jako nośność betonu zbrojonego wypełniającego otwór w elemencie stalowym. Rozpatruje się wtedy główne kryterium projektowe łączników zamkniętych z uwagi na zniszczenie betonu poprzez ścinanie podłużne (ang. concrete dowels). Drugim sposobem jest wyznaczenie nośności przypadającej na jednostkę długości listwy, czyli nośności grupy łączników. W podejściu drugim, oprócz nośności łączników zamkniętych, uwzględnia się także dodatkowe czynniki stanowiące

o nośności połączenia, np.: tarcie pomiędzy stalą, a betonem lub udział docisku czoła części stalowej do betonu. Graficzne zestawienie wybranych czynników mających wpływ na nośność łączników zamkniętych i listwy perfobond przedstawiono na rys. 2.

O ile kryterium nośności betonu w otworze nie budzi wątpliwości, to w przypadku uwzględnienia dodatkowych czynników (udziałów) w nośności listwy nośność ta nie jest prostą sumą czynników składowych i wymaga uwzględnienia zależności pomiędzy tymi czynnikami. Dlatego poszukuje się współczynników częściowych modelu empirycznego połączenia przy wykorzystaniu metod probabilistycznych. Takie podejście przekłada się na wysoką zbieżność z wynikami z badań niszczących, ale rosnąca liczba parametrów oddala od modelu ogólnego.

Pomimo wielu parametrycznych badań niszczących i prób opisu mechanizmu przenoszenia sił prowadzącego do wyznaczenia wzorów określających nośność łącznika za-

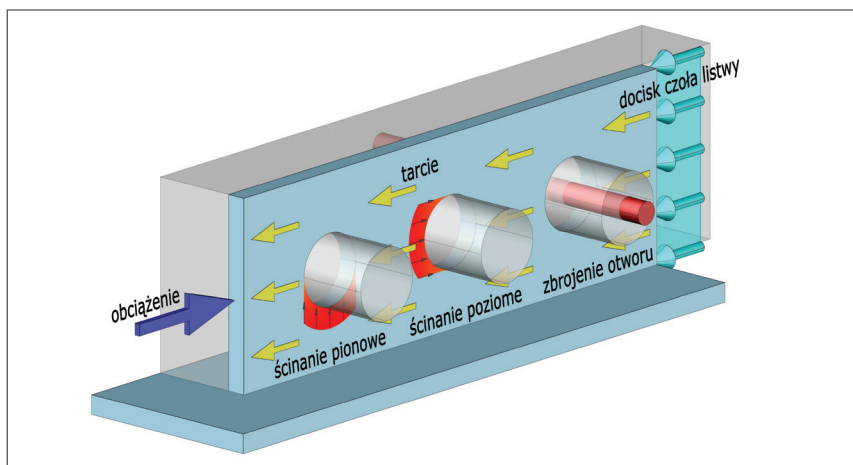


Rys. 1. Łączniki perfobond

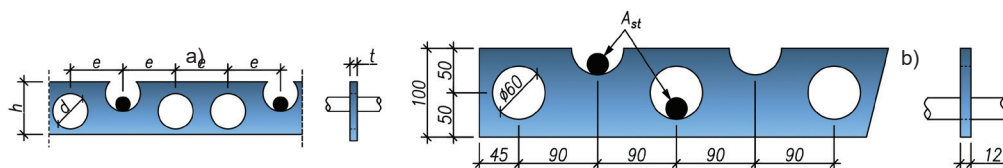
Tab. 1. Podejścia normowe do wyznaczenia nośności łączników typu perforbond

Autor	Podstawa normowa	Nośność	Zakres stosowania
Leonhardt	DIBt [2]	$P_{Rd} = 1,0 \cdot d^2 \cdot \beta_{WN}$	$d = 35 \text{ mm}, t = 12 \text{ mm},$ $e = 50 \text{ mm}, h = 60 \text{ mm}$ albo $d = 40 \text{ mm}, t = 14 \text{ mm},$ $e = 60 \text{ mm}, h = 65 \text{ mm}$
-	Eurokod [3]	$P_{Rd,l} = \frac{273 + 14,1 \cdot f_{cd} + 313 \cdot A_{st}}{1,25}$	$d = 60 \text{ mm}, t = 12 \text{ mm},$ $e = 90 \text{ mm}, h = 100 \text{ mm}$
Hosaka	JSCE [4]	$P_{Rd} = \frac{1,45 \cdot ((d^2 - d_s^2) \cdot f_{cd} + d_s^2 \cdot f_{u,s}) - 106,1}{1,3}$	$73200 < (d^2 - d_s^2) \cdot f_{cd} +$ $+ d_s^2 \cdot f_{u,s} < 488000$

gdzie  $P_{Rd}$ : nośność pojedynczego łącznika [kN];  $P_{Rd,l}$ : nośność charakterystyczna listwy perforbond [kN/m];  $d$ : średnica otworu;  $d_s$ : średnica zbrojenia poprzecznego w otworze;  $\beta_{WN}$ : wytrzymałość betonu na ściskanie określona na kostkach sześciennych o boku 200 mm;  $f_{ck}$ : wytrzymałość betonu na ściskanie;  $f_{u,s}$ : wytrzymałość na rozciąganie stali zbrojeniowej;  $A_{st}$ : pole zbrojenia poprzecznego łączników



Rys. 2. Elementy składowe nośności listwy perforbond: ściananie betonu w otworze, udział zbrojenia poprzecznego przechodzącego przez otwór, tarcie pomiędzy stalą listwy a betonem, docisk czoła listwy do betonu [1]



Rys. 3. Geometria łącznika perforbond wg a) DIBt [2], b) Eurokod [3]

mnętego nadal dominuje podejście półempiryczne. W efekcie bezpośredni wpływ na dokładność oszacowania ma zbieżność sytuacji projektowej z przeprowadzonymi badaniami, będącymi podstawą do wyprowadzenia wzoru. W literaturze technicznej podane jest kilkadziesiąt takich wzorów, które dla tych samych warunków brzegowych prowadzą do znacznych rozbieżności.

W witycznych normowych przytoczono trzy procedury do wyznaczenia obliczeniowych nośności łączników perforbond z warunków zniszczenia betonu zbrojonego (tab. 1).

Wzory te zostały wyprowadzone empirycznie, stąd narzucony zakres stosowania. Oprócz nośności części betonowej kryterium zniszczenia stali pomiędzy łącznikami zapewniono poprzez zdefiniowanie geometrii listwy podanej na rys. 3.

Pomimo wielu propozycji do szacowania nośności łączników perforbond wąski przedział ich stosowania, połączony z brakiem modelu mechanicznego, utrudnia projektowanie tego typu zespolenia. W praktyce projektowej, gdy parametry zespolenia wykraczają poza zakres stosowania wzorów, doko-

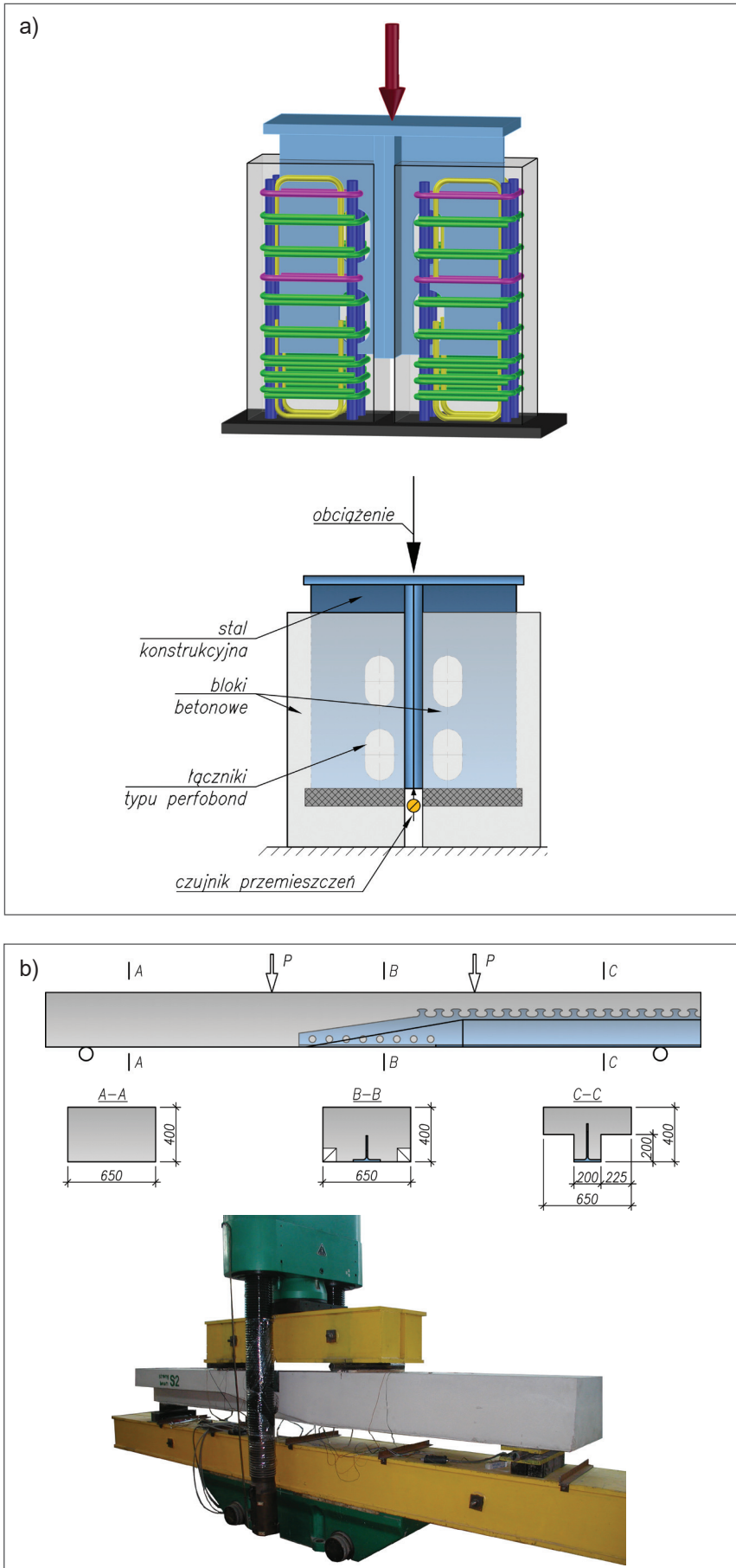
nuje się oszacowania na podstawie literatury i uzupełnia np. znormalizowaną procedurą wyznaczania nośności ciągłych łączników otwartych typu MCL [5]. Uwzględnia się wtedy dodatkowe mechanizmy zniszczenia, takie jak kryterium docisku powierzchni łącznika stalowego do betonu, przebitego betonu i ścięcia łącznika stalowego.

### Badania doświadczalne

Zaletą badań doświadczalnych jest możliwość określenia siły niszczącej dla dowolnej geometrii, rozkładu łączników czy parametrów materiałowych. Jest to jednak podejście pracochłonne i kosztowne, wymagające dostępu do laboratorium badawczego.

Jednym z najczęściej stosowanych sposobów doświadczalnego określenia nośności łączników zamkniętych jest próba czystego ścinania. Próba POST (ang. Push-Out Standard Test) to standardowe badanie wg [6], umożliwiające symulację przepływu sił ścinających w łącznikach konstrukcji zespolonej. Podczas badania mierzy się poślizg podłużny między betonem a elementem stalowym oraz wyznacza się siłę niszczącą zespolenie. Wskutek przyłożenia obciążenia do górnej części próbki środkowa część elementu jest ściskana, a łączniki które znajdują się w betonie, są ścinane (rys. 4a).

Możliwe jest także pośrednie określenie nośności grupy łączników, np. na elementach belkowych. Można wtedy zweryfikować nośności grupy łączników w złożonym układzie obciążenia. Badania takie przeprowadzono m.in. na Politechnice Wrocławskiej, testując nośność grupy łączników znajdujących się w tzw. strefie przejściowej belki hybrydowej (rys. 4b.) [1]. Wyniki badań elementów belkowych potwierdzają duże nośności zarówno w kierunku pionowym, jak i poziomym oraz wysoką ciągliwość łączników. Badaniom poddano łączniki okrągłe i owalne. Na przy-



Rys. 4. Elementy do badań: a) elementy typu POST, b) belki hybrydowe – schemat badania wraz z przekrojami charakterystycznymi, widok stanowiska badawczego, c) zależność pomiędzy maksymalnym momentem zginającym a przemieszczeniem pionowym w połowie rozpiętości belki [7]

kład, w badaniu 8 łączników okrągłych uzyskano maksymalny moment zginający  $M_{(test,max)} = 587 \text{ kNm}$ , uzyskując nośność strefy przejściowej większą od plastycznych, charakterystycznych nośności przekroju żelbetowego i zespolonego (rys. 4c.). Zastosowane łączniki zamknięte wykazały quasi-liniową odpowiedź na działające obciążenia do ok. 60% obciążenia niszczącego oraz dużą ciągliwość. Szczegółowy opis wyników badań niszczących okrągłych i owalnych łączników przedstawiono w [1].

Obecnie na Politechnice Wrocławskiej przygotowywane są badania typu POST jako badania porównawcze łączników owalnych, które testowano w modelach belkowych. Zaprojektowana geometria oraz układ zbrojenia łączników dotychczas nie zostały zbadane i opisane w literaturze.

Z uwagi na bardzo dobre wyniki badań niszczących, łączniki perfobond zostały wykorzystane w kluczowych zakotwieniach Systemu Budowy Mostów V-FIT, a podejście łączące wytyczne z literatury z dodatkowymi mechanizmami zniszczenia połączenia ciągłego jako bezpieczne oszacowanie nośności łączników.

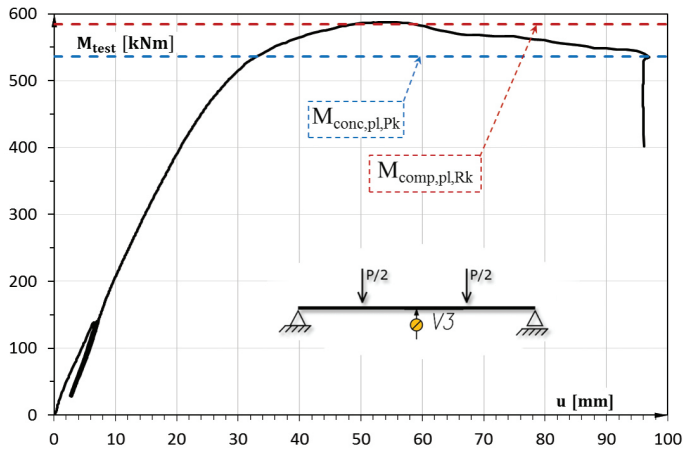
### Podsumowanie

Duże rozbieżności w podejściach do szacowania nośności łączników zamkniętych wynikają z uwzględnienia dodatkowych czynników (tzw. udziałów), najczęściej zwiększających nośność łączników. Wzory dostępne w literaturze bazują na modelu empirycznym lub półempirycznym. Opierają się więc najczęściej na przeprowadzonych przez danego autora badaniach, a na uzyskaną dokładność wyników wpływa liczba przeprowadzonych prób typu POST.

Analizując różne rozwiązania listwy perfobond, stwierdza się, że nośność otworu wzrasta wraz ze wzrostem pola łącznika, tj. średnicą otworu. Korzystny wpływ na nośność i ciągliwość połączenia ma także wzrost pola zbrojenia przeprowadzonego przez ten łącznik. W większości podejść dostępnych w literaturze kryterium zniszczenia połączenia polega na zniszczeniu betonu w łączniku. Należy także pamiętać, że optymalizacja części stalowej, np. poprzez redukcję grubości elementu stalowego, będzie prowadziła do powstania nowych mechanizmów zniszczenia, np. ścięcia stali pomiędzy łącznikami (analogicznie jak w przypadku łączników otwartych).

Brak wytycznych normowych oraz pełnego modelu opisującego zachowanie się betonu w łączniku niewątpliwie ogranicza stosowanie przedmiotowego rozwiązania w praktyce inżynierskiej.

Z drugiej strony liczne badania i prace naukowe nad łącznikami typu perfobond wskazują na ciągle zainteresowanie tym rodzajem zespolenia, a przyjęte konserwatywnie no-



Rys. 4c

ności łączników umożliwiają wykorzystywanie zalet połączenia w wielu nowych rozwiązaniach konstrukcyjnych.

Literatura

[1] Kozioł P., Nośność łączników stalowych w strefie połączenia elementu zespolonego z elementem betonowym, Raport z serii PRE3/2018. Rozprawa doktorska, Politechnika Wroclawska, Wroclaw, 2018.  
 [2] Zulassungsbescheid Z-26.1-23: 1991, Perfbond-Leiste, Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin.  
 [3] CSN-EN 1994-2:2012, Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures. Part 2: General rules and rules for bridges.  
 [4] Standard Specifications for Steel and Composite Structures: 1 General Provision, 2 Structural Planning, 3 Design. Tokio: Committee on Steel Structure, Subcommittee of Standard Specifications for Steel and Composite Structures, 2009.

[5] Zulassungsbescheid Z-26.4-56: 2013, Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Verbunddübelleisten, Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin.  
 [6] PN-EN 1994-1-1:2008, Eurokod 4: Projektowanie zespolonych konstrukcji stalowo-betonowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.  
 [7] Kozioł P., Kozuch M. P., Lorenc W., Rowiński S., Connection capacity of the transition zone in steel-concrete hybrid beam, Civil and Environmental Engineering Reports, vol. 25, no. 2, pp. 137-146, 2017.

DOI: 10.5604/01.3001.0013.9715

PRAWIDŁOWY SPOSÓB CYTOWANIA  
 Kozioł Piotr, 2020, Metody wyznaczania nośności łączników zamkniętych typu perfbond, „Builder” 04 (273). DOI: 10.5604/01.3001.0013.9715

**Streszczenie:** Łączniki zamknięte typu perfbond to obecnie jeden z podstawowych sposobów rozwiązania ciągłego zespolenia w stalowo-betonowych konstrukcjach zespolonych. W artykule przedstawiono najczęściej stosowane metody wyznaczania nośności łączników typu perfbond. Omówiono podejście analityczne, wskazując na podstawowe i dodatkowe mechanizmy zniszczenia połączenia. Ponadto podsumowano doświadczalne sposoby wyznaczenia siły niszczącej.

**Słowa kluczowe:** łączniki perfbond, nośność połączenia, konstrukcje zespolone, badania niszczące

**Abstract:** Perfbond shear connectors are currently one of the basic ways of continuous shear connection in steel and concrete composite structures. The following paper presents the most frequently used methods of determining the load capacity of perfbond connectors. Analytical approach is discussed, pointing to basic and additional failure mechanisms. In addition to, experimental methods of determining the load-bearing capacity of the connection are summarised.

**Keywords:** perfbond connector, connection capacity, composite structures, destructive tests

# ODPOWIADAMY NA WSPÓŁCZESNE WYZWANIA BRANŻY ENERGETYCZNEJ

## XII Konferencja Naukowo-Techniczna Budownictwo w Energetyce