

# Specyfika projektowania stropów prefabrykowanych na przykładzie płyt kanałowych

## Specificity of precast floor design, on the example of the hollow-core slabs

Wit Derkowski<sup>1,\*</sup>, Miłosz Jeziorski<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Linnæus University, Sweden

<sup>2</sup>Consolis Technology Development Centre

\*Corresponding author: W. Derkowski, e-mail: [wit.derkowski@lnu.se](mailto:wit.derkowski@lnu.se)

### Streszczenie

Stropy prefabrykowane zyskują coraz większą popularność we współczesnym budownictwie, przede wszystkim z uwagi na ich szybką realizację. Jednakże zapisy norm dotyczących projektowania stropów są często niejednoznaczne, a czasami wątpliwe. W artykule omówiono wybrane zagadnienia projektowania stropów z płyt kanałowych, które często sprawiają problemy w praktyce projektowej, podając odwołania do odpowiednich badań naukowych w tym zakresie. Szczególną uwagę poświęcono zasadom dystrybucji obciążenia skupionego na sąsiednie płyty w polu stropowym, wykonywania otworów w stropach, zagadnieniom podparcia stropu oraz uwzględniania tarczowej pracy płyty stropowej.

**Słowa kluczowe:** płyty kanałowe, projektowanie, stropy prefabrykowane

### Summary

Precast floors are gaining more and more popularity in modern construction, mainly due to their fast realization. However, the provisions of standards regarding floor design are often ambiguous and sometimes questionable. The article discusses selected issues of HC slabs design, which often pose problems in practice, with references to relevant scientific research in this field. Particular attention was paid to the principles of distribution of the concentrated load on adjacent slabs in the floor field, openings in the floors, support conditions and taking into account the slab function as an element of a floor.

**Keywords:** design, hollow-core slabs, precast floors, standards

## 1. Wprowadzenie

Sprężone prefabrykowane płyty kanałowe [HC] stanowią popularne i efektywne rozwiązanie, pozwalające na realizację stropów o dużej rozpiętości, co przyczynia się do ponownie rosnącej popularności współczesnych budynków prefabrykowanych, mieszkalnych i użyteczności publicznej (1). Widok realizacji w pełni prefabrykowanego budynku ze stropami z płyt HC, pokazano na rys. 1. Kanały, stanowiące około 50% powierzchni przekroju poprzecznego, zmniejszają ilość użytej mieszanki betonowej, co przekłada się na mniejszy ślad węglowy wyrobu oraz niski ciężar elementu, który oprócz redukcji obciążenia na inne elementy konstrukcji obiektu, znacznie ułatwia montaż stropu. W płytach tych nie ma żadnego zbrojenia poprzecznego, a jedyne zbrojenie stanowią cięgna sprężające, co przyczynia się do zmniejszenia zużycia stali w stosunku do innych rozwiązań stropowych, o podobnych rozpiętościach. Powszechnie stosuje się płyty o wysokościach

## 1. Introduction

The prestressed precast hollow-core slabs [HC] are popular and effective solution, which allow the execution of large span floors, which contribute to the growing popularity of the contemporary prefabricated residential and public utility buildings (1). The view of the implementation of a fully prefabricated building with HC slabs is shown in Fig. 1. Tubular voids, constituting about 50% of the cross-sectional area, reduce the amount of concrete mix used, which rearranges into a lower carbon footprint of the product and a low mass of the element, which in addition to reducing the load on other elements of the structure, the significantly facilitates the installation of the floor. These slabs do not have any transverse reinforcement, and the only reinforcement consists of prestressing tendons, which contributes to the reduction of steel consumption compared to other floor solutions, with similar spans. Plates with a height of 150 to 500 mm are commonly used, in which the chan-

od 150 do 500 mm, wysokości, w których kanały, w zależności od technologii realizacji, mogą przyjmować kształty owalne, lub zbliżone do prostokątnych.

Stropy prefabrykowane, wymiaruje się zazwyczaj na obciążenia pionowe, stałe oraz zmienne, głównie z uwagi na nośność zginania oraz ścinania. Z uwagi na specyfikę sprężonych konstrukcji prefabrykowanych, płyty należy wymiarować nie tylko w trwałej sytuacji obliczeniowej, lecz także w sytuacjach przejściowych, takich jak zwolnienie naciągu, transport, montaż, czy innych tego wymagających. Należy także pamiętać o sprawdzeniu płyty w sytuacji pożarowej.

Stropy tego rodzaju nierzadko obciążane są nie tylko powierzchniowo, lecz także punktowo czy liniowo, przez co poddane mogą być nie tylko ścinaniu i zginaniu, ale i skręcaniu. Zagadnienie skręcania płyt kanałowych zostało szerzej omówione przez Broo i in. (2) oraz Azizova i in. (3). W praktyce projektowej powszechnie spotyka się płyty z otworami koniecznymi, np. do realizacji przejść instalacyjnych w stropie. W stropach mogą być także większe otwory, które ze względu na swoje gabaryty mogą wymagać zastosowania dodatkowych wymiarów stalowych lub żelbetowych. Z uwagi na przestrzenną pracę stropu, wynikającą z zastosowania monolitycznych złączy podłużnych między elementami, płyty stropowe wykonane z elementów prefabrykowanych wykazują pewną zdolność do wzajemnej współpracy. Na nośność i odkształcalność stropów prefabrykowanych niewątpliwie korzystnie wpływa wykonanie warstwy nadbetonu konstrukcyjnego, odpowiednio zespolonej z prefabrykatem.

Oprócz zasadniczej funkcji, jaką jest przenoszenie obciążeń pionowych, stropy z płyt kanałowych wykorzystuje się także, jako tarcze stropowe, zdolne do przenoszenia obciążeń poziomych na pionowe elementy konstrukcyjne – jest to zagadnienie szczególnie ważne, w projektowaniu budynków wysokich.

## 2. Nośność stropu – współpraca między prefabrykatami

Stropy wykonane z płyt HC zwykle wymiaruje się, jako wydzielone elementy wolnopodparte. Założenie to jest prawidłowe w przypadku stropu o regularnym kształcie oraz równomiernym obciążeniu. W praktyce projektowej spotyka się jednak stropy obciążone siłami skupionymi czy też liniowymi, jak i stropy mające otworowania. W przypadkach takich, strop nadal obliczać można zakładając brak współpracy między sąsiednimi elementami, jednakże założenie to jest konserwatywne i może powodować konieczność zastosowania większej ilości zbrojenia czy też, w sytuacji skrajnej, wymagać zastosowania płyty o wyższym przekroju poprzecznym. W rzeczywistości, złącza monolityczne między płytami oraz sztywność skrętna prefabrykatu, zapewniają wzajemną współpracę między poszczególnymi elementami w przenoszeniu obciążeń pionowych, co korzystnie wpływa na nośność oraz użyteczność ustroju. Oba te podejścia obliczeniowe schematycznie pokazano na rys. 2.



Rys 1. Realizacja budynku szkieletowego ze stropami z płyt HC

Fig. 1. Realization of a frame concrete building with HC slab ceilings

nels, depending on the manufacturing technology, may take oval or close to the rectangular shapes.

Prefabricated ceilings are usually dimensioned for vertical, permanent, and variable loads, mainly due to the bending and shear load capacity. Due to the specificity of prestressed prefabricated structures, the slabs should be dimensioned not only in a permanent design situation, but also in temporary situations, such as detensioning, transport, assembly, or other situations that require them. Also, it should be kept in mind, to check the slab in a fire situation.

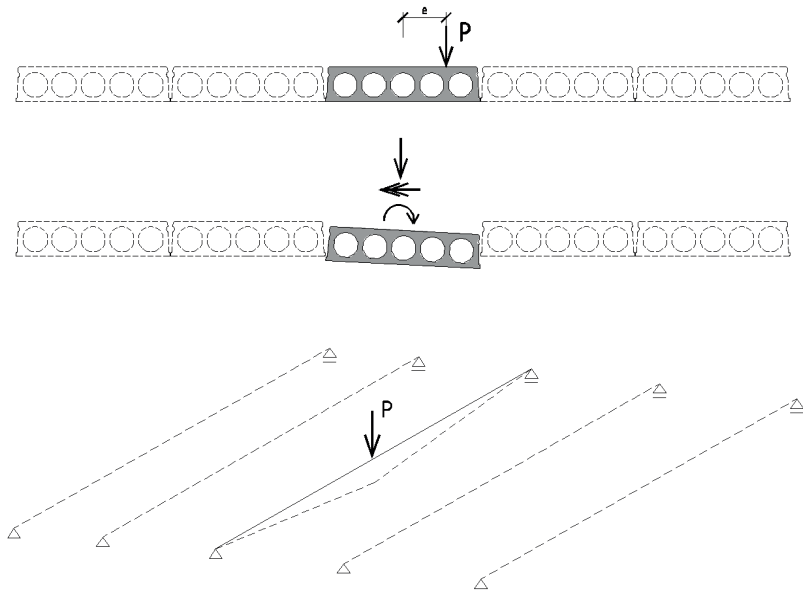
Ceilings of this type are sometimes loaded not only on by a uniformly distributed load but also by point or linear loads, so they can be subjected not only to shear and bending but also to torsion. The issue of torsion of hollow-core units is discussed in more details by Broo et al. (2) and by Azizov et al. in (3). In design practice, it is common to find slabs with openings necessary, for example, for the implementation of installation passages in the ceiling. Larger openings can also be made in the ceilings, which, due to their dimensions, may require additional steel or reinforced concrete trimmer beams. Due to the spatial work of the floor slab, resulting from the use of monolithic longitudinal joints between the elements, ceiling slabs made of prefabricated elements, show a certain ability to cooperate with each other. Undoubtedly, the load-bearing capacity and deformability of prefabricated floors is positively influenced by the execution of the structural topping, suitably bonded with the prefabricated element.

In addition to the essential function of transferring vertical loads, hollow-core slabs are also used as diaphragms that transmits lateral loads to the vertical resisting elements of a structure - an issue of particular importance in the design of the tall buildings.

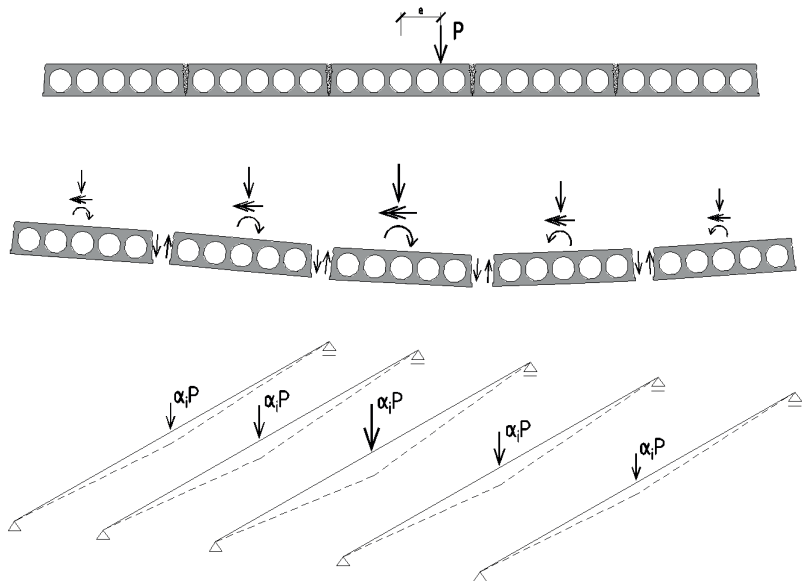
## 2. Load capacity – cooperation between the prefabricates

Floors made of HC slabs are usually dimensioned as separate free-supported elements. This assumption is correct in the case

Wydzielony element wolnopodparty: / A separate free-support element:



Współpracujący element stropu: / Cooperating ceiling element:



Rys 2. Ideowy schemat współpracy płyt HC w przeniesieniu obciążenia skupionego

Fig. 2. A schematic diagram of the cooperation of HC plates in the transfer of concentrated load

Z uwagi na zarysowanie styku spowodowane skurczem betonu, które wystąpić może przed przyłożeniem obciążenia do stropu (4), powszechnie zakłada się, iż złącza te przenoszą jedynie siły ścinające. Założenie to stanowi także podstawę metody graficznej, zawartej w załączniku C do normy (5). Znajdują się tam nomogramy, z których odczytuje się wartość współczynnika dystrybucji obciążenia w zależności od rozpiętości stropu, rodzaju obciążenia przyłożonego na strop oraz lokalizacji siły, względem krawędzi stropu. Podane wartości współczynników, w przypadku obciążenia punktowego, dotyczą obciążenia przyłożonego w środku przęsła [ $l/x = 2$ ]. W przypadku obciążeń przyłożonych blisko podpory, to jest  $l/x \geq 20$ , obciążenie w bezpośrednio obciążonej płycie należy

of a ceiling plan with the regular shape and even load. However, in design practice, there are ceilings loaded with concentrated or linear loads, as well as with openings. In such cases, the floor slab can still be calculated, assuming the lack of cooperation between adjacent elements, however, this assumption is conservative and may result in the need to use more reinforcement. In extreme situations, it may require the use of a slab with a higher cross-section. In fact, monolithic joints between plates and the torsional stiffness of the prefabricated element, ensure mutual cooperation between the individual elements in transferring vertical loads, which has a positive effect on the load-bearing capacity and serviceability of the system. Both computational approaches are schematically shown in Fig. 2.

Due to cracking of the joint caused, among others, by concrete shrinkage, which may occur before the load is applied to the floor (4). It is commonly assumed that these joints only transmit shear forces. This assumption is also the basis of the graphical method included in Annex C, to the standard (5). There are nomograms from which the value of the load distribution coefficient is read depending on the span of the ceiling, the type of load applied to it and the location of the force in relation to the floor edge. The given values of the coefficients, in the case of point load, refer to the load applied in the middle of the span [ $l/x = 2$ ]. In the case of applied loads close to the support, i.e.  $l/x \geq 20$ , the load in the directly loaded slab should be taken as 100% and in the adjacent slabs 0%. Linear interpolation is used for intermediate cases. It is also possible to interpolate the coefficient values, when the load is applied between the middle and end slabs. Note that the standard only covers the case of load distribution, in ceiling consisting of 5 elements. If no structural topping is provided on the slabs, the load factor on the directly loaded slab, should increase by 25%.

The graphs in Annex C were developed based on the analytical model presented in the FIP report (6). This report only refers to the linear load case, however, it points out some limitations that the reader will not find in the standard. The graphical method does not take into account the geometry of the HC slab, although the report emphasizes that the ability of the plates to cooperate with each other depends to a large extent on the ratio of the flexural stiffness, to the torsional stiffness of the slab. This report clearly indicates that the model presented relates to the redistribution of bending moments. It is worth noting here that the standard (5) does not specify the impact, to which the graphically determined coefficients should be used.

In 1990, at the Technical Institute of Finland [VTT], tests were carried out on the ceiling made of 4 hollow-core slabs, 400 mm high

przyjąć jako 100%, a w płytach sąsiednich 0%. Dla przypadków pośrednich stosuje się interpolację liniową. Interpolować można także wartości współczynnika, w przypadku gdy obciążenie przykłada się pomiędzy płytą środkową, a skrajną. Należy zwrócić uwagę, że norma uwzględnia jedynie przypadek dystrybucji obciążenia, w stropach składających się z 5 elementów. Jeżeli na płytach nie wykonano nadbetonu, to współczynnik obciążenia na bezpośrednio obciążonej płycie, należy zwiększyć o 25%.

Wykresy w załączniku C opracowano na podstawie modelu analitycznego, przedstawionego w raporcie FIP (6). Raport ten odnosi się jedynie do przypadku obciążenia liniowego, jednakże wskazuje na pewne ograniczenia, których czytelnik nie znajdzie w normie. Metoda graficzna nie bierze pod uwagę geometrii płyty, chociaż raport podkreśla, iż zdolność do wzajemnej współpracy między płytami, zależy w dużym stopniu od stosunku sztywności giętej do sztywności skrętnej płyty. Raport ten jasno wskazuje, że przedstawiony model odnosi się do redystrybucji momentów zginających. Warto zaznaczyć, że norma (5) nie precyzuje do jakiego oddziaływania należy stosować, wyznaczone graficznie współczynniki.

W 1990 roku w Fińskim Instytucie Technicznym [VTT] przeprowadzono badania na stropie wykonanym z 4 płyt kanałowych o wysokości 400 mm i długości 6 m (7). Wyniki tych badań analizował Parkinnen (8), porównując je z metodą przedstawioną w raporcie FIP jak i z innymi, wtedy dostępnymi modelami analitycznymi. Jednym z głównych jego wniosków było, iż stropy z płyt kanałowych wykazują o wiele gorszą zdolność do redystrybucji, gdy rozpatrywane jest ścinanie, a nie zginanie. Wniosek ten pokrywa się z uproszczonymi, lecz bardzo restryktywnymi w odniesieniu do ścinania, zaleceniami PCI (9). Zależność między rozpatrywanym oddziaływaniem a zdolnością do redystrybucji analizuje także Stanton (10), który proponuje dokładniejszą metodę analityczną, w której zamiast współczynników dystrybucji, wprowadza się pojęcie szerokości współpracującej. Stanton podaje różne szerokości współpracujące dla wyznaczania przemieszczeń, momentów gnących, sił ścinających oraz momentów skręcających. W przypadku ścinania oraz skręcania uwzględnia także geometrię płyty. Propozycję uwzględnienia wpływu wielkości geometrycznych płyty oraz rodzaju oddziaływania, przedstawił także Lindström (11), opracowując wykresy dla dwóch stosunków sztywności giętej do sztywności skrętnej oraz oddzielne wykresy, dla zginania oraz ścinania.

Przytoczone opracowania wskazują na niedoskonałości metody graficznej, przedstawionej w normie (5). Poniżej, na rys. 3, pokazano wyniki analizy porównawczej poszczególnych wytycznych obliczeniowych, z wynikami badań zrealizowanych w VTT na stropie 12-metrowym, składającym się z 6 płyt o wysokości 400 mm (12).

Analiza ta pokazuje, że stosowanie przepisów europejskich normy (5) lub propozycji Lindströma (11), może prowadzić do znacznego zaniżenia reakcji podporowej, co stanowi zagrożenie bezpieczeństwa konstrukcji. Z drugiej strony zastosowanie metody

and 6 m long (7). The results of these studies were analyzed by Parkinnen (8), which compared them with the method presented in the FIP report and with other analytical models available then. One of the main his conclusions was that hollow-core slabs show a much poorer redistribution capacity when considered is shear, rather than bending. This conclusion is in line with the simplified, but very restrictive in terms of shear, PCI recommendations (9). The relationship between the interaction considered and the ability to redistribute is also analyzed by Stanton (10), who proposes a more precise analytical method, in which the concept of the cooperating width is introduced instead of the distribution coefficients. Stanton gives different cooperating widths for the determination of displacements, bending moments, shear forces, and torsional moments. In the case of shear and torsion, he also takes into account the geometry of the slab. The proposal to take into account the influence of the geometric properties of the slab and the type of action, was also presented by Lindström (11), who developed diagrams for two ratios of flexural stiffness to torsional stiffness and separate diagrams, for bending and shear.

The studies cited indicate the imperfections of the graphical method presented in the standard (5). Fig. 3 shows the results of a comparative analysis of individual calculation guidelines, with the results of tests carried out in VTT on a 12-meters ceiling, consisting of 6 of 400 mm high slabs (12).

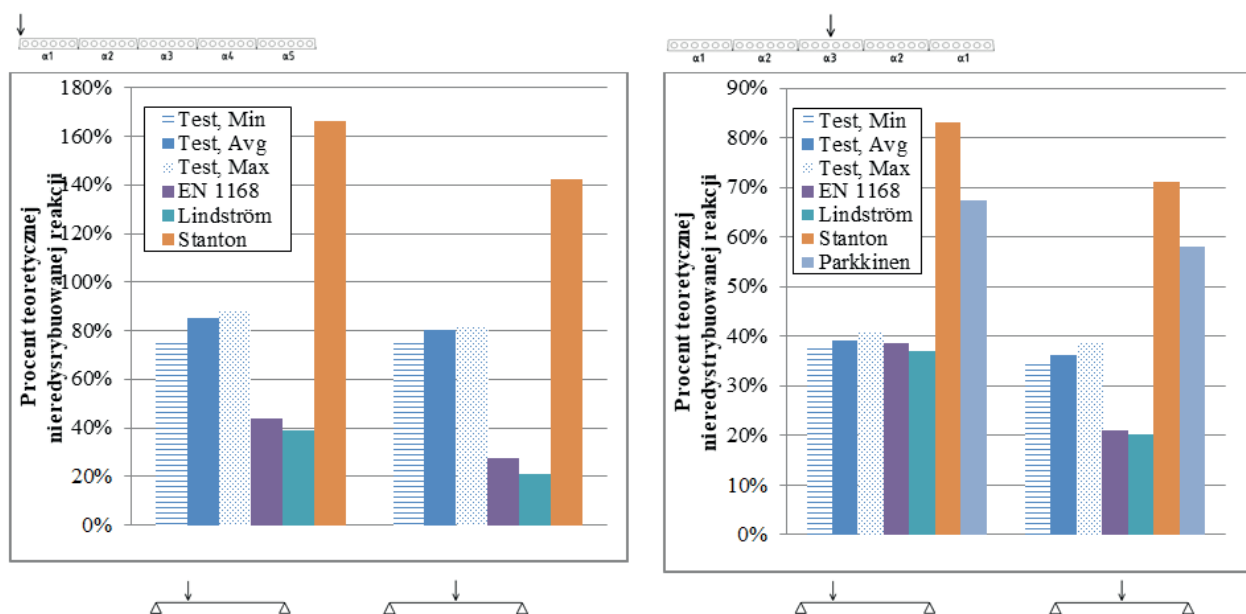
This analysis shows that the application of the regulations of the European standard (5) or Lindström's proposal (11), can lead to a significant underestimation of the support response, which is a threat to the safety of the structure. On the other hand, the application of the method presented by PCI (9), Stanton (10) or also Parkinnen (8) may lead to a significant overestimation of the impact.

When designing a ceiling loaded with a concentrated or linear force, it is also necessary to check, according to the requirements of the standard (5), the resistance due to punching, transverse bending, and the resistance of the joint between prefabricated elements.

The punching shear capacity of the hollow-core slab can be calculated according to the points 4.3.3.2.4 of the standard (5). It requires that the punching resistance obtained be halved, if more than 50% of the concentrated force acts on the edge rib of the slab. Full load capacity can only be used if two conditions are simultaneously met:

- at least one prestressing tendon is in the edge rib,
- in the structural topping, there is a fully anchored reinforcement, at least 1.20 m long.

It should also be noted that the concentrated load causes the plate bending moments, in two directions. Due to the lack of transverse reinforcement of prefabricated elements, the permissible concentrated load applied to the ceiling is determined, in accordance with the points 4.3.3.2.5 of the standard (5), as the product of the slab section modulus in the transverse direction and the tensile strength of concrete. An important role here is to determine the actual mechanical properties of concrete, which in thin-walled elements may



Rys. 3. Porównanie wielkości reakcji podporowej otrzymanej w badaniach (12), z wartościami obliczonymi wg przytoczonych metod analitycznych  
 Fig. 3. Comparison of the size of the support reaction obtained in the tests (12), with the values calculated according to the given analytical methods cited

przedstawionej przez PCI (9), Stantona (10) czy też Parkkinena (8), prowadzić może do znacznego zawyżenia oddziaływania.

Projektując strop obciążony siłą skupioną lub liniową, należy także sprawdzić, zgodnie z wymaganiami normy (5), nośność na przebicie, zginanie poprzeczne oraz nośność złącza między prefabrykatami.

Nośność na przebicie płyty kanałowej można obliczać zgodnie z p. 4.3.3.2.4 normy (5). Norma wymaga, aby uzyskaną nośność na przebicie zmniejszyć o połowę, jeżeli ponad 50% siły skupionej, działa na żebro skrajne płyty. Pełną nośność można stosować jedynie wtedy, gdy jednocześnie spełnione są dwa warunki:

- co najmniej jedno cięgno sprężające znajduje się w żebrze skrajnym,
- w nadbetonie, znajduje się w pełni zakotwione zbrojenie, o długości co najmniej 1,20 m.

Należy również zwrócić uwagę, że obciążenie skupione wywołuje momenty zginające płytę, w dwóch kierunkach. Z uwagi na brak zbrojenia poprzecznego prefabrykatów, dopuszczalne obciążenie skupione przyłożone do stropu określa się, zgodnie z p. 4.3.3.2.5 normy (5), jako iloczyn wskaźnika bezwładności płyty w kierunku poprzecznym oraz wytrzymałości betonu na rozciąganie. Ważną rolę odgrywa tutaj określenie rzeczywistych właściwości mechanicznych betonu, które w elementach cienkościennych mogą znacznie różnić się od tzw. właściwości normowych, przypisanych danej klasie wytrzymałościowej betonu. Znaczne obniżenie wytrzymałości oraz odkształcalności betonu w cienkich żeberkach płyt, poddanych oddziaływaniu sprzężonych pól ciepło-wilgotnościowych przy ich formowaniu na podgrzewanych torach naciągowych, zostało wykazane w pracy Flagi i in. (13).

differ significantly from the so-called standard properties assigned to a given concrete strength class. A significant reduction in the strength and deformability of the concrete in the thin ribs of slabs, subjected to the influence of coupled hygro-thermal fields, during their formation on heated tensioning tracks, was demonstrated in the work of Flaga et al. (13).

The load capacity of the joint itself is determined according to the standard (5) as the lower of the two values: the load capacity of the precast flanges or the load capacity of the joint between the units. As shown in work (14), the joint decisive factor is not the joint load capacity itself, but the shear load capacity of the channel slab flanges.

Comparative analysis of the design load capacity with the test results (12) shows that punching shear was the decisive criterion for the load capacity in the analyzed case, however, the failure force estimated according to standard (5), was only 31% of the failure force, in the test. In addition, the failure load due to bending, without taking into account the redistribution, was only 36% of the force value obtained in the test - this indicates a significant design reserve in the ceiling load capacity. The application of the load distribution coefficient in accordance with the standard (5), however, leads to an overestimation of the bending resistance by as much as 34%, this is confirmed by the conclusion of Parkkinen, who emphasized that ceilings made of high hollow-core slabs with rectangular channels show a worse ability to distribute loads, than the standard EN 1168 indicates.

The analyzes presented above clearly show that the correct determination of the distribution of loads between prefabricated elements requires further, in-depth research and analysis.

Nośność samego złącza wyznacza się według normy (5), jako mniejszą z dwóch wielkości: nośności półek prefabrykatu, lub nośności samego zamka między płytami. Jak wykazano w badaniach (14), decydująca nie jest nośność samego złącza, a nośność na ścinanie półek płyty kanałowej.

Z przeprowadzonej analizy porównawczej nośności obliczeniowej z wynikami badań (12) wynika, że decydującym kryterium nośności w analizowanym przypadku było przebiecie, jednakże siła niszcząca oszacowana zgodnie z normą (5), wyniosła zaledwie 31% siły niszczącej w badaniu. Dodatkowo, siła niszcząca ze względu na zginanie, bez uwzględnienia redystrybucji, wyniosła zaledwie 36% siły uzyskanej w badaniu – wskazuje to na znaczną rezerwę obliczeniową, w nośności stropu. Zastosowanie w tym przypadku współczynnika dystrybucji obciążenia zgodnie z normą (5), prowadzi jednakże do przeszacowania nośności na zginanie, aż o 34%. Potwierdza to wniosek Parkinnena, który podkreślał, iż stropy wykonane z wysokich płyt kanałowych o kanałach prostokątnych, wykazują gorszą zdolność do dystrybucji obciążeń, niż wskazuje na to norma EN 1168.

Przedstawione powyżej analizy jednoznacznie wykazują, że prawidłowe określenie dystrybucji obciążeń między prefabrykatami, wymaga dalszych, pogłębionych badań i analiz.

### 3. Wykonywanie otworów w stropach z płyt HC

W praktyce projektowej rzadko spotyka się stropy, które nie mają żadnych otworów czy wycięć, wymaganych z uwagi na technologię obiektu, jego instalacje czy też architekturę. Wycięcia w płytach kanałowych można wykonywać w zakładzie prefabrykacji, w świeżym betonie, lub w gotowym prefabrykacie, zamontowanym w docelowym stropie.

Ze względu na lokalizację otworu na szerokości płyty wyróżnić można otwory i wycięcia naruszające oraz nienaruszające żebra prefabrykatu, w których znajdują się sploty sprężające, będące jedynym zbrojeniem elementu.

Wycięcia nie powodujące uszkodzenia żeber, przechodzące przez kanał prefabrykatu, to zwykle otwory okrągłe lub owalne, najczęściej wykonywane na budowie – w takim przypadku należy szczególną uwagę skupić na dokładności ich wykonania oraz wyraźnie określić w dokumentacji projektowej strefy, w których otworowanie może być wykonane, bez naruszenia żebra. Wycięcia takie nie wpływają znacznie na nośność płyty przy zginaniu czy ścinaniu, jedynie lekko zmniejszając lokalną sztywność płyty. Nie są takie otwory jednak bez znaczenia, w kontekście skręcania czy też zginania poprzecznego elementu, szczególnie jeżeli otwór znajduje się w pobliżu ekstremum momentu skręcającego, czy też w strefie przyłożenia siły skupionej.

Wycięcia naruszające żebra, a wraz z nimi zbrojenie sprężające, są o wiele bardziej problematyczne. Szczególne znaczenie ma położenie takiego wycięcia, na długości płyty. Otwory znajdujące się bliżej podpory wpłyną znacznie na nośność ścinania, a te,

### 3. Openings in HC slab floors

In design practice, it is rare to find ceilings that do not have any openings or cutouts required due to the technology of the facility, its installations, or architecture. Openings in hollow-core slabs can be made in the precast concrete plant, in fresh concrete, or in a ready-made prefabricated element mounted in the target ceiling.

Due to the location of the opening along the width of the slab, it is possible to distinguish openings and cuts that violate and do not damage the ribs of the precast element, in which there are prestressing strands, which are the only reinforcement of the element.

Openings that do not damage the ribs, passing through the prefabricated channel, are usually round or oval holes, most often made at the construction site. In this case, special attention should be paid to the accuracy of their execution and clearly specified in the design documentation the zones in which the opening can be made, without damaging the webs. Such cuts do not significantly affect the slab's bending or shear load-bearing capacity, are only slightly lowering the local plate stiffness. However, such holes are not without significance in the context of torsion or transverse bending of the element, especially if the hole is located near the extreme torque, or in the zone of concentrated force application.

The openings that infringe the ribs, and with them the prestressing reinforcement, are much more problematic. The location of such an opening along the length of the slab is of particular importance. The openings closer to the support will have a significant effect on the shear resistance, and those near the span center will influence the bending capacity. As the prestressing tendon in prestressed concrete begins to work along the transmission length, even a small-sized cut cutting the string weakens the slab over a considerable distance. The cutouts made in the precast plant also need to be taken into account, in the calculation situations of lifting out of the mold, transport or assembly.

Taking into account the cooperation between the elements of the floor with openings have the positive effect on their load-bearing capacity. It is assumed that the intact slab, adjacent to the plate disturbed by the opening, due to its greater stiffness, will take up the part of the load, applied to the weakened element. Unfortunately, the standard (5) does not contain provisions, that would allow this phenomenon to be taken into account. It is possible to use American provisions (9) or analyzes carried out by an Italian team from the University of Parma (15-17), which provides numerous graphs that allow for taking into account the spatial cooperation between prefabricates, violated by the openings.

In HC floor slab, openings exceeding the full width of the slab, i.e. 1.2 m, are also made. Openings of such dimensions require trimmer beams. Usually, reinforced concrete or steel trimmers are used due to the ease of installation, as shown in Fig. 4.

The supporting unit for the steel trimmer should be dimensioned in two calculation phases, schematically shown in Fig. 5:

– in the assembly phase, before the monolithization of the joints

które znajdują się w pobliżu środka przęsła, wpływ będą miały na nośność zginania. Ponieważ ciągną sprężające w strunobetonie, zaczyna pracować na długości transmisji, to nawet nieznacznej wielkości wycięcie przecinające strunę, osłabia płytę na znacznym odcinku. Wycięcia wykonane w zakładzie prefabrykacji wymagają dodatkowo, także uwzględnienia w obliczeniach wyciągania z formy, transportu czy montażu.

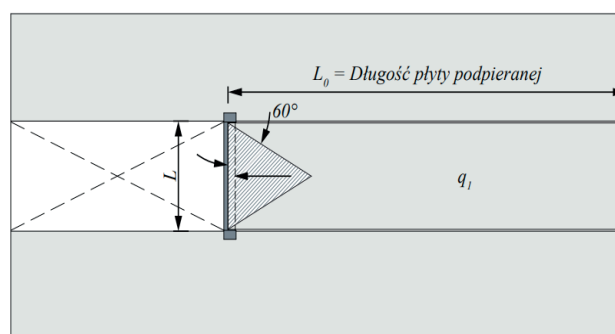
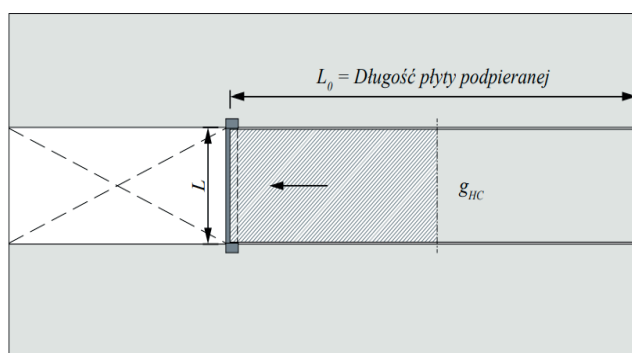
Uwzględnienie współpracy między elementami stropu z otworami, pozytywnie wpływa na ich nośność. Zakłada się, że płyta nienaruszona, sąsiadująca z płytą naruszoną otworem, z uwagi na większą swoją sztywność, przejmie część obciążenia przyłożonego do elementu osłabionego. Niestety w normie (5) nie znajdują się zapisy, które pozwoliłyby na uwzględnienie tego zjawiska. Posiłkować się można zapisami amerykańskimi (9), czy też analizami przeprowadzonymi przez zespół włoski, z Uniwersytetu w Parmie (15-17), opatrzonymi licznymi wykresami pozwalającymi na uwzględnienie przestrzennej współpracy między prefabrykatami, naruszonymi przez otwory.

W stropach z płyt HC wykonuje się także otwory przekraczające pełną szerokość płyty, to jest 1,2 m. Otwory o takich gabarytach, wymagają zastosowania wymian<sup>1</sup>. Stosuje się wymiany żelbetowe lub stalowe, znacznie popularniejsze z uwagi na łatwość montażu, – rys. 4.



Rys. 4. Przykładowy wymian stalowy firmy PEIKKO PETRA (18)

Fig. 4. An example of a steel trimmer by PEIKKO PETRA (18)



Rys. 5. Schematy przekazywania obciążeń z wymian na płytę podpierającą (18)

Fig. 5. Diagrams of loads transfers from replacement to the supporting plate (18)

Płytę podpierającą wymian stalowy należy wymiarować w dwóch fazach obliczeniowych, schematycznie pokazanych na rys. 5:

- w fazie montażu, przed rozpowszechnieniem zamków między płytami: płyta podpierająca obciążona jest siłą punktową na krawędzi, wynikającą z ciężaru płyty podpieranej, z uwzględnieniem ciężaru własnego betonu w zamkach oraz ewentualnego nadbetonu, nie rozpatruje się wtedy współpracy w przekazywaniu obciążeń między płytami;
- w fazie eksploatacyjnej, po rozpowszechnieniu zamków między płytami: płyta podpierająca obciążona jest siłą punktową na krawędzi, wynikającą z trójkątnego rozkładu ciężaru własnego płyty podpieranej oraz obciążenia użytkowego i stałego przyłożonego do płyty, jak i siłą liniową przyłożoną na

- between the panels: the supporting slab is loaded with a point force on the edge, resulting from the weight of the supported slab, with taking into account the weight of the concrete in the closing and possibly of the overconcrete, then cooperation in the transfer of the loads between the slabs, is not considered;
- in operation phase, after monolithization of the joints between the panels: the supporting plate is loaded with a point force on the edge, resulting from the triangular distribution of the slab's own weight, and permanent load applied to the slab, as well as the linear force applied on the edge of the slab, resulting from the load transfer by the joint. In this situation, redistribution of the loads, can be used.

<sup>1</sup> Przepis Redakcji: „wymian” żargon stosowany w języku używanym w budownictwie

krawędzi płyty, wynikającą z przekazywania obciążenia przez zamek. W tej sytuacji można stosować redystrybucję obciążeń.

#### 4. Warunki podparcia stropu

Sposób ukształtowania węzła oparcia prefabrykatów stropowych na podporze, powinien być efektem przyjętego schematu statycznego płyty. Stropowe płyty kanałowe projektuje się zazwyczaj jako swobodnie podparte, chociaż istnieje możliwość projektowania płyt ciągłych lub przewieszonych.

Przegubowe podparcie płyt najlepiej jest wykonywać przez zastosowanie liniowych podkładek neoprenowych. W przypadku opierania płyt na murach lub płyt o stosunkowo niedużej rozpiętości, możliwe jest układanie prefabrykatów stropowych na zaprawie cementowej. Należy jednak pamiętać, iż w przypadku czysto przegubowego oparcia, w wyniku obrotu płyty na podporze oraz powstających odkształceń termicznych i reologicznych, powstaje dodatkowa pozioma reakcja w podporze – patrz rys. 6 – która może powodować uszkodzenia w postaci odsłonięcia otuliny betonowej belki podpierającej.

W praktyce oparcie płyt prefabrykowanych na podporze nigdy nie stanowi idealnie przegubowego połączenia i, w konsekwencji, w strefach przypodporowych mogą powstawać niezamierzone siły podłużne i „ujemne” momenty zginające. Takie częściowe zamocowanie płyt, powstaje w wyniku następujących zjawisk zachodzących w złączu:

- docisk pochodzący od ścian wyższych kondygnacji - w budynkach o konstrukcjach ściennych. W takiej sytuacji pojawianie się kolejnych obciążeń płyty stropowej, generuje powstawanie ujemnych momentów zginających w strefach przypodporowych;
- tarcie na górnej i dolnej powierzchni elementu stropowego, zależne od rodzaju materiałów użytych w złączu;
- przyczepność adhezyjna na styku powierzchni czołowej płyty i betonu wypełniającego styk poprzeczny wzdłuż osi podpory - w procesie projektowania zazwyczaj przyjmuje się zarysowanie styku między prefabrykatami a betonem uzupełniającym, jednakże w rzeczywistości styki te często pracują jako niezarysowane i wprowadzają pewien stopień zamocowania płyty;
- dyblowanie powstałe w wyniku wypełniania końcowych fragmentów kanałów betonem uzupełniającym, układanym w wieńcach;
- praca prętów zbrojeniowych kotwiących płytę stropową nad podporą czy też wymaganych ze względu na zabezpieczenie konstrukcji prefabrykowanej przed katastrofą postępującą, w układanych w stykach podłużnych między prefabrykatami, w wypełnionych kanałach i/lub w nadbetonie.

Pewnym sposobem ograniczania niezamierzonego efektu zamocowania, jest odpowiednie przygotowanie prefabrykatów stropowych przed ich oparciem na podporze - linia położenia zatyczek zamy-



Rys. 6. Reakcje w podporze przy przegubowym oparciu płyty oraz widok możliwych uszkodzeń belki podporowej

Fig. 6. Reactions in the support at the articulated support of the slab and the view of possible damage of the support beam

#### 4. Floor support conditions

The method of shaping the support zone of the precast floor elements should be the result of the adopted static scheme of the slab. Hollow-core slabs are typically designed as simply supported, although it is possible to design continuous or overhanging slabs.

The hinge support of the slabs is best achieved by using linear neoprene strips. In the case of plates supported on walls or plates with a relatively short span, it is possible to lay floor prefabricates on the cement mortar. However, it should be remembered that in the case of a purely hinged support, as a result of the plate rotation on the support and the thermal and rheological deformations, an additional horizontal reaction in the support arises - see Fig. 6 - which may cause damage in the form of spalling of the concrete cover, of the supporting beam.

In practice, the bearing of the prefabricated slabs on the support never constitutes a perfectly hinged joint and, consequently, unintended internal longitudinal forces and „negative” bending moments can arise in the support zones. Such partial restraint of the slabs is created as a result of the following phenomena occurring in the joint:

- the pressure from the walls of higher floors - in buildings with a wall structure. In such a situation, the appearance of successive loads on the floor slab, generates negative bending moments in the support zones,
- friction on the top and bottom surfaces of the floor element, depending on the type of materials used in the joint,
- adhesion at the contact surface of the slab and the filling concrete transverse joint along the axis of the support - in the de-



kających kanały, pokrywać się powinna z krawędzią ścian, a nie być przesunięta w głąb kanałów. Jeszcze lepszy efekt uzyskuje się lukowo lub ukośnie ścinając końcówki elementów, jednakże jest to zabieg powodujący pewne utrudnienia technologiczne.

Siły wewnętrzne: niezamierzony podporowy „ujemny” moment zginający  $M_{Edf}$  oraz niezamierzona siła podłużna  $N_{Edf}$  mogą być określone na podstawie Załącznika E do normy EN 1168 (5).

W przypadku powstania znacznego ujemnego momentu zginającego w strefie przypodorowej płyt kanałowych - zamierzonego lub niezamierzonego, zazwyczaj stosuje się następujące rozwiązania zdążające do ograniczenia zarysowania tak, aby nie dopuścić do powstania zagrożenia bezpieczeństwa konstrukcji:

- zastosowanie płyt kanałowych sprężonych dodatkowo górnymi cięgnami sprężającymi. Dla zmniejszenia długości transmisji w górnych cięgnach stosuje się cięgna o mniejszych średnicach, np. druty nagniatane lub profilowane;
- zastosowania zbrojenia zwykłego o odpowiedniej długości, górnego oraz dolnego, w stykach podłużnych lub wypełnionych kanałach;
- zastosowanie zbrojonej warstwy nadbetonu konstrukcyjnego.

Podporami stropów z płyt kanałowych zazwyczaj są ściany lub sztywne belki, jednakże istnieją również realizacje, w których prefabrykaty stropowe opierają się na niskich belkach, o stosunkowo małej sztywności – mogą to być np. niskie strunobetonowe belki RT, stalowe belki IFB, czy kapeluszowe lub stalowo-betonowe belki zespolone. Tego rodzaju rozwiązanie, w którym wysokość belki jest zbliżona od wysokości opieranego elementu, wymaga przeprowadzenia analizy wpływu podatności podpory, na nośność na ścinanie elementów płytowych. Żadna z norm nie precyzuje, które belki należy traktować jako podatne, ale w pracy Surmy (19) podano, że podpora jest podatna jeżeli jej ugięcie od obciążeń występujących po zespoleniu z płytami będzie większe niż  $1/1100 \div 1/1350$  jej rozpiętości, w zależności od płyty kanałowej.

W stropach Slim Floor, wraz ze wzrostem ugięcia belek następuje deformacja układu płyt stropowych, w konsekwencji czego w płycie powstaje złożony stan naprężenia – pojawiają się poprzeczne naprężenia normalne i styczne. Elementy stropowe oparte na rozciąganej półce dźwigara, mają tendencję do przemieszczenia się w kierunku podłużnym dźwigara, czemu przeciwstawiają się adhezyjne siły przyczepności oraz siły tarcia w złącze płyta-dźwigar. Efektem takiego mechanizmu jest pojawienie się strumienia poziomego naprężenia stycznego w żeberku płyty, o przebiegu równoległym do osi dźwigara.

Zmienna krzywizna dźwigara, w zależności od miejsca oparcia płyt kanałowych, jest powodem różnic w ich schemacie pracy. Płyty w środkowych polach stropowych są przede wszystkim zginane poprzecznie, a przy odpowiednio dużym ugięciu podpory, mogą się one opierać na dźwigarze wyłącznie w obszarze swoich skrajnych żeberk. Zewnętrzne płyty układu stropowego poddane są przede wszystkim deformacji poprzecznej, w wyniku ścinania

sign process, cracking of the contact between the prefabricated elements and the supplementary concrete is usually assumed, but in reality these contacts often work as non-cracked and introduce a certain degree of fixing of the slab,

- dowel action resulting from filling the end fragments of the channels with supplementary concrete laid in the tie beams;
- work of the reinforcing bars anchoring the floor slab above the support, or required to protect the prefabricated structure against a progressive collapse laid in the longitudinal joints between prefabricated elements, in filled channels and/or in concrete topping.

A proper way to reduce the unintended fixing effect is to properly prepare the voids before resting them on the support - the line of plugs closing the channels, should coincide with the edge of the walls and not be moved deeper into the channels. An even better effect is obtained by curving or obliquely cutting the ends of the elements, however, it is a procedure that causes certain technological difficulties.

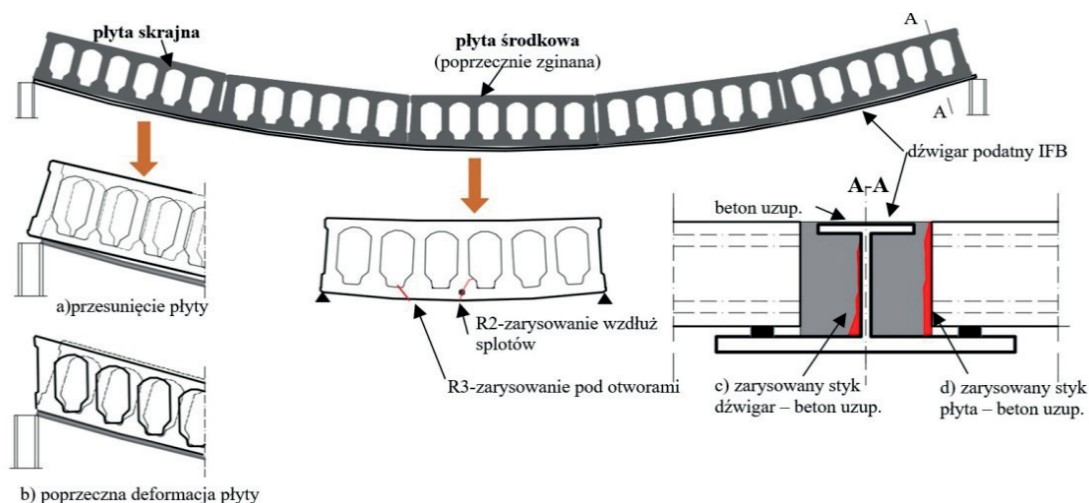
Internal forces: the unintended „negative” bending moment  $M_{Edf}$  and the unintentional longitudinal force  $N_{Edf}$  can be determined from Annex E of EN 1168 (5).

In the case of a significant negative bending moment in the support zone of the hollow-core slabs - intentional or unintended, the following solutions are usually applied, to limit the cracking in order to avoid a threat to the safety of the structure:

- the use of hollow-core slabs additionally prestressed with upper tendons. To reduce the transmission length in the upper tendons, lower diameters are used, e.g. burnished or profiled wires,
- use of ordinary reinforcement of appropriate length, top and bottom, in longitudinal joints or filled channels,
- the use of the reinforced layer of structural concrete topping.

The supports of hollow-core slabs are usually walls or rigid beams, however, there are also implementations in which the prefabricated ceilings are based on low beams with relatively low stiffness - these can be, for example, low prestressed RT beams, steel IFB beams, hat or steel-concrete composite beams. This type of solution, in which the height of the beam is similar to the height of the supported element, requires an analysis of the influence of the support's susceptibility on the shear capacity of the plate elements. None of the standards specifies which beams should be treated as flexible, but Surma (19) states that a support is flexible if its deflection from loads occurring after joining with plates is greater than  $1/1100 \div 1/1350$  of its span, in depending on the type of hollow core.

In Slim Floors, along with the increase in deflection of the beams, the deformation of the ceiling slab arrangement takes place, as a consequence of which a complex state of stress arises in the slab - normal and shear transverse stresses appear. The floor elements based on the tensioned flange, tend to move in the longitudinal direction of the girder, which is opposed by the adhesive forces



Rys. 7. Efekt oparcia płyt kanałowych na podporze podatnej

Fig. 7. The effect of supporting the hollow-core slabs on the flexible support

poprzecznego. Schemat pracy płyt stropowych, w zależności od lokalizacji na ugiętym dźwigarze, przedstawiono na rys. 7 (20).

Badania doświadczalne prowadzone w Finlandii (21) oraz w Niemczech (22) wykazały, że zniszczenie płyt kanałowych następuje pod wpływem siły tnącej, o wartości mniejszej nawet do 60% niż w przypadku płyt opartych na podporach sztywnych.

Pomimo coraz częstszych realizacji konstrukcji tego rodzaju, w obowiązującej normie (5) można jedynie znaleźć następujący zapis: „w przypadku podpór podatnych, należy uwzględnić redukcję nośności w efekcie poprzecznych naprężeń ścinających”. W dokumencie tym nie podano jednak żadnej metody obliczeniowej dla tego zagadnienia, podczas gdy np. wytyczne Deutsches Institut für Bautechnik (23) mówią o konieczności stosowania aż 50% redukcji nośności na ścinanie w porównaniu z przypadkiem oparcia na podporach sztywnych.

Propozycję metody uwzględniania tego zjawiska w obliczeniach inżynierskich podano w rekomendacjach *fib*(24) oraz (5) - model obliczeniowy zakłada, że zniszczenie płyty w wyniku ścinania, nastąpi w wyniku osiągnięcia przez główne naprężenia rozciągające  $\sigma_1$  w żeberkach płyty przekroczy wytrzymałość betonu na rozciąganie  $f_{ctd}$ . To właśnie składowa poziomych naprężenia stycznego  $\tau_x$ , generowana jest w wyniku podatności podpory. Warunek zniszczenia betonowych żeber w złożonym stanie naprężenia, przyjmuje następującą postać:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2 + \tau_{zx}^2} \leq f_{ctd}, \quad [1]$$

Należy zwrócić uwagę, że w przypadku nośności na ścinanie płyt stropowych opartych na podporach podatnych ma duży korzystny wpływ na wykonywanie warstwy nadbetonu konstrukcyjnego (25).

## 5. Tarcze stropowe złożone z płyt HC

Zapewnienie zdolności stropu do tarczowej pracy to jedna z metod uzyskania odpowiedniej sztywności przestrzennej budynków

of adhesion and friction forces in the slab-girder joint. The effect of such a mechanism is the appearance of a flux of horizontal tangential stress in the web of the plate, running parallel to the girder's axis.

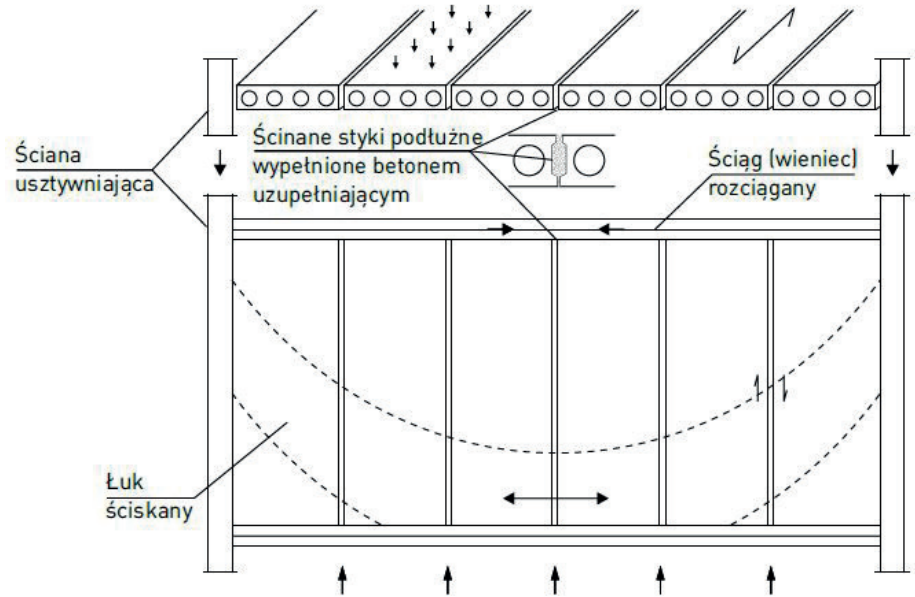
The variable curvature of the beam, depending on the position of the hollow-core units, is the reason for the differences in their behaviour. The slabs in the middle floor fields are primarily transversely bent, and with a correspondingly large deflection of the support, they can only rest on the girder in the area of their outermost ribs. The outer slabs of the floor system are primarily subjected to the transverse deformation, as a result of transverse shear. The diagram of the floor slabs operation, depending on the location on the deflected girder, is shown in Fig. 7 (20).

Experimental studies conducted in Finland (21) and Germany (22) have shown, that the failure of hollow-core slabs occurs under the influence of a shear force of up to 60% less, than in the case of slabs based on rigid supports.

Despite the more and more frequent implementation of this kind of structure, the applicable standard (5) only states the following: „in the case of flexible supports, the reduction of the bearing capacity due to transverse shear stresses should be taken into account”. However, this document does not provide any calculation procedure for this issue, while e.g. the guidelines of the Deutsches Institut für Bautechnik (23) say that it is necessary to use as much as 50% reduction of the shear resistance, compared to the case of supporting on rigid supports.

The method proposed to consider this phenomenon in engineering calculations is given in *fib* (24) and (5) - the calculation model assumes that the failure of the slab as a result of shear, will occur as a result of the main tensile stress  $\sigma_1$  in the slab ribs reaching the tensile strength  $f_{ctd}$ . It is the horizontal tangential stress component  $\tau_x$  that is generated as a result of compliance with the support. The condition for the failure of concrete ribs in a complex state of stress takes the following form:

prefabrykowanych, szczególnie budynków o konstrukcji szkieletowej. Przyjmuje się, że jeśli odległość między elementami usztywniającymi obiekt wynosi więcej niż 6 – 10 m, to strop musi być zaprojektowany jako tarcza, zdolna do przeniesienia poziomych sił ścinających oraz momentów zginających. Płyta powinna pracować jak membrana w każdym kierunku, jednak zwykle jest to ograniczone jedynie do dwóch ortogonalnych – uzyskuje się to przez zapewnienie odpowiednich połączeń między prefabrykatami oraz prawidłowe konstruowanie wieńców. Model tarczowej pracy, na przykładzie stropu z płyt kanałowych, schematycznie pokazano na rys. 8.



Rys. 8. Model tarczowej pracy stropu prefabrykowanego

Fig. 8. Model of the shield work of the prefabricated ceiling

Styki podłużne między prefabrykatami, powinny być ukształtowane w taki sposób, aby uniemożliwić wzajemne przemieszczanie się elementów – dzięki temu uzyskuje się równomierne rozłożenie powstających sił ścinających na długości stropu. W przypadkach kiedy spodziewane jest duże ścinanie między prefabrykatami - np. w stropach dużych rozpiętości, na terenach sejsmicznych, dla zwiększenia nośności styku na ścinanie podłużne, krawędzie boczne prefabrykatów można specjalnie kształtować, np. w postaci powierzchni dyblowanych lub sinusoidalnie falowanych. Nośność poprawi także wykonanie na płytach warstwy nadbetonu konstrukcyjnego.

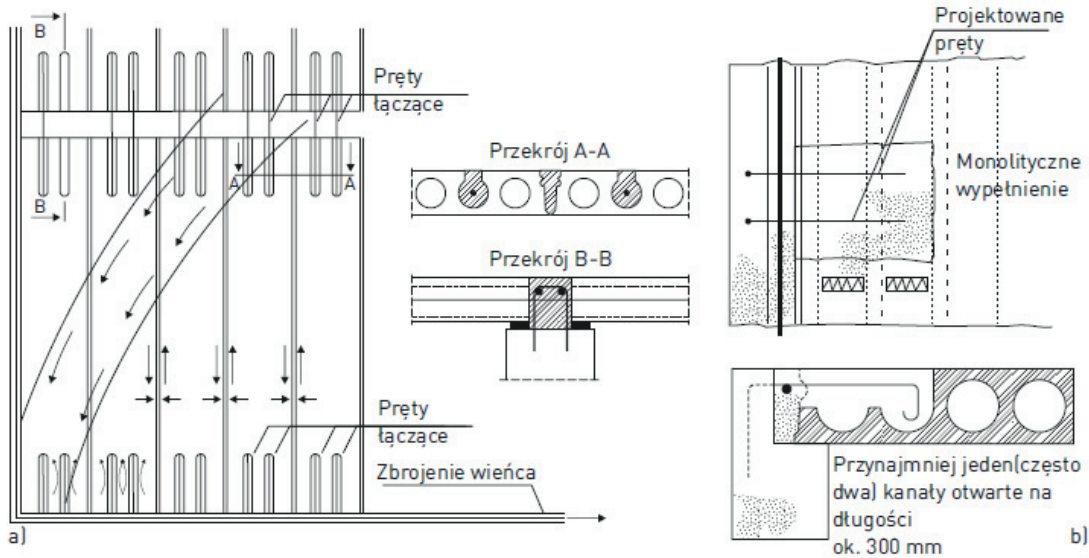
Drugim ważnym elementem zapewnienia tarczowej pracy płyty stropowej, jest dobre wykonanie wieńców i odpowiednie ich połączenie z elementami prefabrykowanymi. Przykładowe rozwiązanie przedstawiono na rys. 9 (26). Eurokody EN 1991-1-7 (27) oraz

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2 + \tau_{zx}^2} \leq f_{ctd}, \quad [1]$$

It should be noted that in the case of shear resistance of ceiling slabs based on flexible supports, a large beneficial effect on the construction of the structural concrete topping (25)

### 5. Diaphragm action of HC slabs

Ensuring the ability of the floor to work like a diaphragm is one of the ways to obtain the appropriate spatial stiffness of prefabricated



Rys. 9. Przykładowa metoda łączenia stropu prefabrykowanego z wieńcami

Fig. 9. An example of the method of joining the prefabricated ceiling with tie beams

EN 1992-1-1 (28) precyzują, choć z pewnymi różnicami, wymagania stawiane wieńcom w budynkach, jednakże, w przypadku konieczności uwzględnienia pracy tarczowej stropu, powierzchnie zbrojenia wieńców, należy oddzielnie obliczyć korzystając z modelu łuku ze ściągami, pokazanego na rys. 8.

## 6. Podsumowanie

Projektowanie stropów prefabrykowanych często sprowadzane jest to wymiarowania pojedynczych, wydzielonych elementów stropowych, z uwagi na zginanie i ścinanie. Ich prawidłowe projektowanie musi jednak uwzględniać szereg dodatkowych aspektów, związanych z pracą całego układu stropowego. Obliczenia nie mogą być oparte jedynie na normie EC2 (28), która podaje tylko ogólne wymagania dla budynków, ale musi opierać się na zapisach odpowiednich norm dla prefabrykowanych wyrobów budowlanych – w przypadku strunobetonowych płyt kanałowych, na normie (5). Jednakże zapisy tych norm są często niejednoznaczne, a czasami wątpliwe. W niniejszym artykule omówiono wybrane zagadnienia projektowania stropów z płyt HC, które często sprawiają problemy w praktyce projektowej, podając odwołania do odpowiednich badań naukowych, w tym zakresie.

## Literatura / References

1. W. Derkowski, Large panels buildings – the possibilities of modern precast industry. *Cem. Wapno Beton* **22**(5), 414 - 425 (2017).
2. H. Broo, K. Lundgren i B. Engstrom, Shear and torsion interaction in prestressed hollow core units. *Mag. Concr. Res.* **57**(9), 521-533 (2005). <https://doi.org/10.1680/macrc.2005.57.9.521>
3. T. Azizov, W. Derkowski i N. Jurkowska, Consideration of the Torsional Stiffness in Hollow-Core Slabs' Design. *Mater. Sci. Forum* **968**, 330-341 (2019).
4. D. a. B. Elliot, Precast Floor Slab Diaphragms Without Structural Screeds. in *Concrete 2000 - Economic and Durable Construction Through Excellence*, Dundee, September 1993.
5. UNI EN, 1168:2005+A3:2011 Precast concrete products - Hollow core slabs, 2011.
6. A. V. Acker, Transversal distribution of linear loadings in prestressed hollow core floors. in *FIP Symposium*, Calgary, 30 & 31 August, 1984.
7. VTT Technical Research Center of Finland, „RAT12503/91 Variax 4-laataston pistekuormakokeet,” Espoo, 1991.
8. J. T. I. Parkkinen, Analysis of Hollow Core Slab Deck with a Point Load. in *Int. Extruded Concrete Association 6<sup>th</sup> Annual Conference*, Gibraltar, 26-28<sup>th</sup> of April 1991.
9. PCI, *Manual for the Design of Hollow Core Slabs and Walls - Third Edition*, 2015.
10. J. F. Stanton, Response of Hollow-Core Slab Floors to Concentrated Loads. *PCI J.* **37**(4), 98-113 (1992).
11. G. Lindström, *Fib Approach to Hollow-Core Design and Construction - Design topics of cross-sections*. in *fib & PCI Congress*, Washington, May/June 2010.
12. VTT Technical Research Center of Finland, RAT12538/91 – The performance of point-loading tests on deck consisting of six Variax 4 slabs. Espoo, 1991.

buildings, especially buildings with a frame structure. It is assumed that if the distance between the stiffening elements of the structure is greater than 6 - 10 m, the floor must be designed as a diaphragm capable of transferring horizontal shear forces and bending moments. The slab should work like a membrane in all directions, but it is usually limited to only two orthogonal ones - this is achieved by ensuring proper connections between precasted units and the correct design of the tying system. The model of the diaphragm action, based on the example of a floor made of hollow-core slabs, is schematically shown in Fig. 8.

The longitudinal joints between the prefabricated elements should be shaped in such a way, as to prevent mutual displacement of the elements. Thanks to this, an even distribution of the shear forces generated along the length of the ceiling is achieved. In cases where high shear is expected between precast elements, e.g., in long-span ceilings, in seismic areas, in order to increase the longitudinal shear resistance of the joint, the side edges of the prefabricated elements can be specially shaped, e.g.

Another important element to ensure the diaphragm performance of the floor slab, is the good execution of the horizontal tying systems and their proper connection to the prefabricated elements. An example of a solution is shown in Fig. 9 (26). Eurocodes EN 1991-1-7 (27) and EN 1992-1-1 (28) specify, albeit with some differences, the requirements for beams in buildings, however, if one wants to take into account the diaphragm action of the floor, the area of the tie reinforcement should be separately calculated, using the arch model shown in Fig. 8.

## 6. Summary

The design of prefabricated floor slabs often comes down to the dimensioning of single, separate units due to bending and shear. However, their proper design must take into account a number of additional aspects related to the operation of the entire floor system. The calculations cannot be based only on the EC2 standard (28), which only provides general requirements for buildings, but must be based on the provisions of the relevant standards for precast concrete products - in the case of prestressed hollow-core slabs, on the standard (5). However, the provisions of these standards are often ambiguous and sometimes questionable. This article discusses selected issues of designing HC slabs, which often pose problems in design practice, with references to relevant scientific research, in this area.

13. K. Flaga, W. Derkowski i M. Surma, Concrete strength and elasticity of precast thin-walled elements. *Cem. Wapno Beton* **21**(5), 310-317 (2016).
14. I. J. den Uijl, Resistance against vertical shear loading of longitudinal joints between prestressed hollow core slabs. Delft University of Technology, Delft, 1992.
15. P. Bernardi, R. Cerioni, N. Garutt, I. Iori i E. Michelini, Numerical study on structural behavior of HC floors with large openings: short report on research activity. Department of Civil and Environmental Engineering and Architecture, University of Parma, Parco, 2020.
16. P. Bernardi, R. Ceironi i E. Michelini, A non-linear approach for the analysis of hollow core floors with large openings - Part 1. *Concr. Plant Int.* April 2012.
17. P. Bernardi i R. C. E. Michelini, A non-linear approach for the analysis of hollow core floors with large openings - Part 2. *Concr. Plant Int.* June 2012.
18. Peikko, Wymian do płyt kanałowych przy otworach. Instrukcja Techniczna 04/2022 (2022).
19. M. Surma, Shear capacity of prestressed hollow core slabs with concrete topping on flexible supports. PhD Dissertation, Cracow University of Technology, 2018 (in Polish).
20. W. Derkowski, M. Surma, Prestressed hollow core slabs for topped slim floors – Theory and research of the shear capacity. *Eng. Struct.* **241**, 112464 (2021).
21. M. Pajarii, Prestressed hollow core slabs supported on beams. Finnish shear tests on floors in 1990-2006. VTT Working Papers 148, Espoo, 2010.
22. T. Roggendorf, Zur Tragverhalten von Spannbeton-Fertigdecken bei biegsamer Lagerung. PhD Dissertation, RWTH Aachen, 2010.
23. Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung, DIBt, 2007.
24. fib Bulletin No.6, Special design considerations for precast prestressed hollow core floors, fib, 2000.
25. W. Derkowski i M. Surma. Influence of Concrete Topping on Work of Prestressed Hollow Core Slabs on Flexible Supports. in The 4<sup>th</sup> International fib Congress, Mumbai, India, 2014.
26. W. Derkowski et.al., Zeszyt 3 - Obiekty kubaturowe mieszkalne i inne, w których głównym układem konstrukcyjnym są ściany. in Prefabrykacja – jakość, trwałość, różnorodność, Stowarzyszenie Producentów Betonów, 2017.
27. PN-EN1991-1-7:2008, „Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje – Część 1-7: Oddziaływania ogólne – Oddziaływania wyjątkowe,” PKN, 2008.
28. PN-EN1992-1-1:2008, „Eurokod 2 – Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków,” PKN, 2008.