

CirculCon® – nowe oblicze prefabrykacji

CirculCon® – a new face of precast construction

Sławomir Dudziak^{1,*}, Krzysztof Janczura¹

¹PFEIFER Polska Sp. z o.o.

*corresponding author: S. Dudziak, e-mail: slawomir.dudziak@pfeifer.pl

Streszczenie

Budownictwo cyrkularne stanowi odpowiedź na rosnące zapotrzebowanie na surowce naturalne oraz konieczność ograniczenia środowiskowych i ekonomicznych skutków inwestycji budowlanych. Szczególne możliwości w tym zakresie stwarza ponowne wykorzystanie prefabrykowanych elementów konstrukcyjnych pochodzących z demontażu. Analiza dotychczasowych realizacji wskazuje na możliwość znacznego ograniczenia emisji CO_{2eq}, co jednak może wiązać się z wyższymi kosztami wynikającymi m.in. z braku doświadczenia w pracach rozbiórkowych i odpowiednich procedur. Kluczowe znaczenie ma projektowanie od podstaw z myślą o demontażu i ponownym użyciu elementów. Konieczne jest stosowanie mechanicznych i demontowalnych połączeń oraz tworzenie baz danych dostępnych elementów. Przedstawiono założenia projektu CirculCon®, którego celem jest rozwój rozwiązań umożliwiających przemysłowe wdrożenie zasad budownictwa cyrkularnego.

Słowa kluczowe: prefabrykacja betonowa, gospodarka o obiegu zamkniętym, emisja dwutlenku węgla, recykling

Summary

Circular construction is a response to the growing demand for natural resources and the need to reduce the environmental and economic impacts of construction projects. The reuse of precast structural elements recovered through dismantling offers particularly significant opportunities in this regard. An analysis of existing projects indicates the potential for substantial reductions in CO_{2eq} emissions, although this may involve higher costs resulting, among other factors, from a lack of experience in dismantling works and appropriate procedures. Designing buildings from the outset with the future dismantling and reuse of their elements in mind is of key importance. The use of mechanical and demountable connections and the development of databases of available elements are essential. The assumptions of the CirculCon® project are presented. The project aims to develop solutions enabling the industrial implementation of circular construction principles.

Keywords: precast concrete construction, circular economy, carbon dioxide emissions, recycling

1. Wprowadzenie

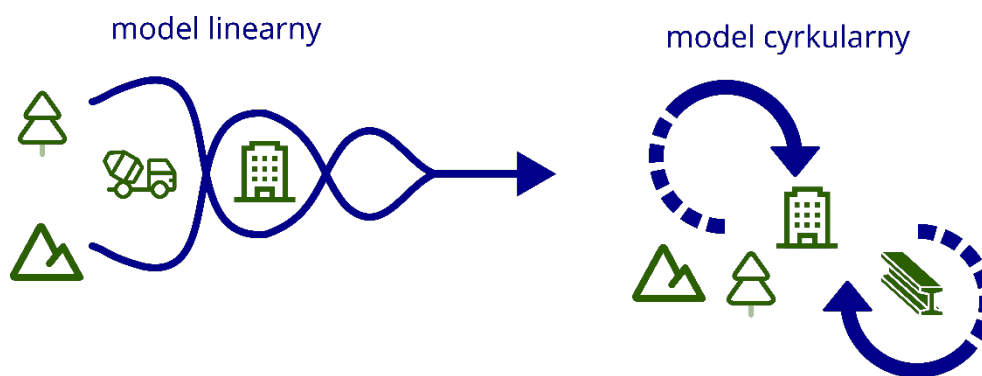
Ciągle zapotrzebowanie na nowe obiekty budowlane, które wynika np. ze zmian demograficznych [starzenie społeczeństw, migracje], technologicznych [centra danych] czy sytuacji kryzysowych, rodzi we współczesnym świecie podstawowe pytanie o dostępność zasobów naturalnych pozwalających na ich budowę w kolejnych latach. Na ten temat prowadzona jest szeroka dyskusja w świecie architektów oraz inżynierów innych branż (1). Kolejnym impulsem do zmiany postrzegania rynku budowlanego przyszłości jest wzrost świadomości nakładów finansowych, ale przede wszystkim obciążeń środowiskowych uwalnianych w czasie produkcji budowlanej, zwłaszcza jej śladu węglowego.

W tym otoczeniu coraz częściej podnosi się znaczenie wznoszenia obiektów budowlanych w tzw. modelu zamkniętym – cyrkularnym,

1. Introduction

The continuing demand for new buildings, driven, for example, by demographic changes [population ageing, migration], technological developments [data centres], and emergency situations, raises a fundamental question in the modern world concerning the availability of natural resources required for their construction in the years to come. This issue is the subject of extensive discussion among architects and engineers from various fields (1). Another factor driving a change in the perception of the future construction market is the growing awareness of financial expenditure and, above all, the environmental burdens generated during the construction process, particularly its carbon footprint.

In this context, increasing importance is being attached to constructing buildings according to a so-called closed-loop, circular



Rys. 1. Modele gospodarki linearnej i cyrkularnej.

Fig. 1. Linear and circular economy models.

w którym raz użyte już wyroby budowlane mogą być, w czasie przebudowy obiektów lub po ich rozbiórce, stosowane ponownie przy wznoszeniu nowych obiektów. Istotną grupę produktów budowlanych mogących znaleźć zastosowanie przy budowie kolejnych obiektów stanowią elementy składające się na konstrukcję nośną. Różnice między aktualnym modelem linearnym a postulowanym modelem cyrkularnym schematycznie pokazano na rys. 1.

2. Budownictwo cyrkularne

Idea budownictwa cyrkularnego tak naprawdę nie jest niczym nowym i była stosowana przez większość historii budownictwa. Przed rewolucją przemysłową w XIX w. ludzie chętnie wykorzystywali lokalnie dostępne materiały z rozbiórek z uwagi na ograniczone możliwości wytwarzania nowych elementów (2). W okresie intensywnej odbudowy powojennych zniszczeń również w dużym zakresie bazowano na materiałach z odzysku (3). Od lat 50. dominującą pozycję w sektorze budowlanym zaczęły zyskiwać konstrukcje z betonu, który stał się tani i łatwo dostępny. Jednocześnie pojawił się trend wyburzania coraz młodszych budynków, które nie spełniały już stawianych im wymagań funkcjonalnych i użytkowych lub przestawały być ekonomicznie uzasadnione. Obecnie beton z rozbiórki jest przeważnie kruszony i dalej wykorzystywany jako materiał na podbudowy lub kruszywo z recyklingu. Następuje zatem jego *downcycling* (4), w ramach którego znaczne ilości energii są zużywane na przekształcenie nośnych elementów konstrukcyjnych, często w bardzo dobrym stanie technicznym (5), w „kupę gruzu”.

Można znaleźć wiele publikacji i opracowań, które pokazują jak nieefektywny, a przede wszystkim szkodliwy dla środowiska naturalnego jest ten schemat postępowania, por. (6). Produkcja stali i cementu odpowiada za ok. 18% światowej emisji dwutlenku węgla, a sektor budowlany generuje ok. 30% odpadów (7). Obecny model linearny budownictwa powoduje z czasem degradację środowiska w skali globalnej, przez przyczynienie się do zmian klimatycznych, oraz na poziomie lokalnym, np. przez zmianę rzeźby terenu wywołaną działalnością kopalni odkrywkowych czy konieczności składowania dużej ilości odpadów. Wiadomo już, że stosowanie kruszywa z recyklingu jest rozwiązaniem ww. problemów jedynie w bardzo ograniczonym zakresie z uwagi na emisje związane z jego przygotowaniem oraz koniecznością po-

model, in which construction products that have already been used can be reused in the construction of new buildings during the reconstruction of existing structures or following their demolition. A significant group of construction products that may be suitable for use in subsequent construction projects comprises elements forming the load-bearing structure. The differences between the current linear model and the proposed circular model are schematically illustrated in Fig. 1.

2. Circular construction

The concept of circular construction is by no means new and was applied throughout much of the history of construction. Before the Industrial Revolution of the nineteenth century, locally available materials recovered from demolished structures were readily reused due to the limited capacity to manufacture new building elements (2). During the period of intensive reconstruction following the Second World War, recovered materials were also used extensively (3). From the 1950s onwards, concrete structures began to gain a dominant position in the construction sector, as concrete became inexpensive and readily available. At the same time, a trend emerged towards demolishing increasingly younger buildings that no longer met the functional and operational requirements imposed on them or had ceased to be economically viable. At present, demolition concrete is predominantly crushed and subsequently used as a sub-base material or as recycled aggregate. It is therefore subject to *downcycling* (4), whereby a considerable amount of energy is expended to transform load-bearing structural elements, often still in very good technical condition (5), into a “pile of rubble”.

Numerous publications and studies demonstrate how inefficient and, above all, environmentally harmful this approach is; see, for example, (6). The production of steel and cement accounts for approximately 18 % of global carbon dioxide emissions, while the construction sector generates approximately 30 % of all waste (7). The current linear construction model progressively degrades the environment both globally, by contributing to climate change, and locally, for example, through landscape alteration caused by open-pit mining and the need to dispose of large quantities of waste. It is now evident that the use of recycled aggregate addresses the above-mentioned problems only to a limited extent, owing to

nowego zastosowania cementu, często w zwiększonej ilości (8). Ponadto stabilność kruszywa powstałego w wyniku recyklingu nie pozwala na w pełni niezawodną produkcję mieszanki betonowej o pożądanych właściwościach mechanicznych.

Efektywne wdrożenie modelu budownictwa cyrkularnego wymaga zatem innego podejścia. Przykładem są próby określenia jego ram i hierarchii priorytetów [„strategia 10-R”] podejmowane przez Duńską Agencję Oceny Środowiskowej [por. rys. 2]. Najwyższy priorytet ma strategia „*refuse*”, czyli powstrzymanie się od wznoszenia nowych obiektów i wydłużanie żywotności istniejących. Na drugim miejscu sklasyfikowano strategię „*rethink*”, czyli wdrożenie proekologicznych sposobów projektowania, tj. projektowania na demontaż DfD [ang. *design for disassembly*], modularności rozwiązań oraz demontowalnych połączeń. W 2026 r. grupa PFEIFER wspólnie z Politechniką Krakowską i Politechniką Wrocławską uruchomiła projekt CirculCon®, którego realizacja pozwoli na wdrożenie strategii „*rethink*” w skali przemysłowej. Projekt składa się z trzech modułów, tzw. PCS:

- *Precast* – metody zwiększenia trwałości prefabrykatów i oceny ich stanu technicznego po demontażu;
- *Connector* – system demontowalnych łączników;
- *Space* – budowa platformy wymiany danych o dostępnych prefabrykatach.

Celem artykułu jest podsumowanie historii i aktualnych trendów budownictwa cyrkularnego oraz przedstawienie założeń i wyzwań projektu CirculCon®. Skupimy się na kwestiach technicznych, środowiskowych i ekonomicznych, świadomie pomijając kwestie formalno-prawne. Przykład norweskiej normy do powtórnego znakowania CE płyt kanałowych (9) pokazuje, że są one możliwe do rozwiązania i pozostają wtórne względem zagadnień inżynierskich.

3. Aktualny stan badań w zakresie budownictwa cyrkularnego

Przegląd 77 pilotażowych projektów, w których do wznoszenia nowych budowli zastosowano elementy pochodzące z rozbiórki można znaleźć w pracach Küpfer z zespołem (2,10). Autorzy podzielił rozwój współczesnego budownictwa cyrkularnego na 3 okresy: 1967–1998 pionierski, 1999–2010 przejściowy, od 2011 dywersyfikacji i szybkiego rozwoju. Na podstawie zebranych danych stwierdzono, że w odzysku całych elementów budowlanych przodują Niemcy [57% analizowanych przypadków] i Niderlandy [21%]. Zdecydowana większość przykładów ponownego wykorzystania elementów konstrukcyjnych dotyczyła budynków wykonanych w technologii prefabrykowanej [84%], chociaż w ostatnich latach [po roku 2020] podejmowane są również próby odzyskiwania fragmentów konstrukcji monolitycznych (11). Wyraźne zainteresowanie tym tematem widoczne jest w Szwajcarii (8).

Niezwykle korzystnie wyglądają względne redukcje emisji CO_{2eq} w stosunku do budowy z nowych elementów podane dla wybranych przykładów (10), które mieszczą się w zakresie od 44% do

the emissions associated with its processing and the need to use cement again, often in increased quantities (8). Furthermore, the variability of recycled aggregate obtained through recycling does not allow the production of concrete mixtures with the desired mechanical properties to be fully reliable.

Effective implementation of the circular construction model therefore requires a different approach. One example is the attempt to establish its framework and hierarchy of priorities, referred to as the “10-R strategy”, undertaken by the Danish Environmental Protection Agency [see Fig. 2]. The highest priority is assigned to the “*refuse*” strategy, i.e. refraining from constructing new buildings and extending the service life of existing ones. The second-highest priority is assigned to the “*rethink*” strategy, i.e. implementing environmentally responsible design approaches, such as design for disassembly [DfD], modular solutions, and demountable connections. In 2026, the PFEIFER Group, together with Krakow University of Technology and Wrocław University of Science and Technology, launched the CirculCon® project, the implementation of which will enable the “*rethink*” strategy to be introduced on an industrial scale. The project comprises three modules, referred to as PCS.

- *Precast* – methods for increasing the durability of precast elements and assessing their technical condition after disassembly;
- *Connector* – a system of demountable connectors;
- *Space* – development of a data-exchange platform for available precast elements.

The aim of this paper is to summarise the history and current trends in circular construction and to present the assumptions and challenges of the CirculCon® project. The focus is placed on technical, environmental, and economic aspects, while legal and regulatory issues are deliberately excluded. The example of the Norwegian standard enabling the re-application of CE marking to hollow-core slabs (9) demonstrates that such issues can be resolved and remain secondary to engineering considerations.

3. Current state of research on circular construction

A review of 77 pilot projects in which elements recovered from demolished structures were used in the construction of new buildings is presented in the studies by Küpfer et al. (2, 10). The authors divided the development of modern circular construction into three periods: 1967–1998, the pioneering period; 1999–2010, the transition period; and from 2011 onwards, the period of diversification and rapid development. Based on the collected data, it was found that Germany [57 % of the analysed cases] and the Netherlands [21 %] are the leading countries in the recovery of complete building elements. The vast majority of examples of the reuse of structural elements concerned buildings constructed using precast technology [84 %]. In recent years [after 2020], attempts have also been made to recover components of monolithic

wysoki priorytet



niski priorytet

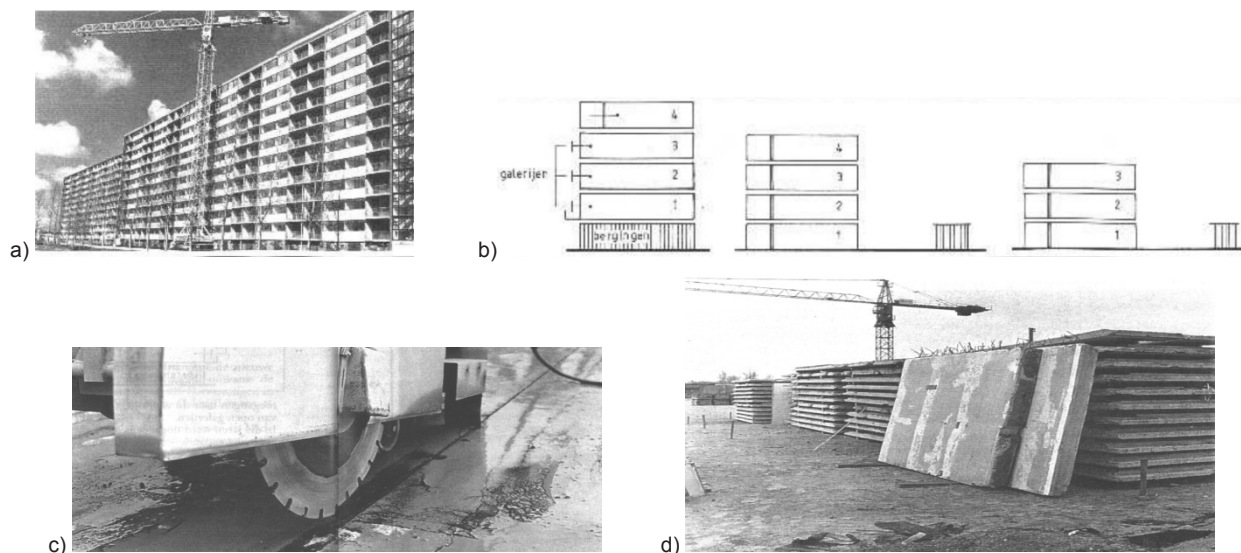
Rys. 2. Strategia 10-R budownictwa cykularnego opartego na prefabrykatach z betonu (7).

Fig. 2. 10-R strategy for circular construction based on precast concrete elements (7).

nawet 90%. Analizy kosztów dla wybranych przykładów wyglądają nieco mniej korzystnie, zaprezentowano względne różnice kosztów w przedziale od -30% do +54%. Należy mieć jednak na uwadze, że rozwiązania prototypowe, bez gotowych procedur projektowych czy wykonawczych, zawsze są znacznie bardziej kosztochłonne z uwagi na większe ryzyko, więc w tym zakresie na pewno możliwe są dalsze redukcje.

structures (11). A particularly strong interest in this subject can be observed in Switzerland (8).

The relative reductions in CO_{2eq} emissions compared with construction using new elements reported for selected examples (10) are particularly favourable, ranging from 44 % to as much as 90 %. Cost analyses for selected examples are somewhat less



Rys. 3. Projekt Middelburg, Niderlandy 1986 r.: a) budynek przed rozbiórką, b) koncepcja podziału, c) przecinanie złączy specjalną piłą, d) składowanie płyt z rozbiórki na placu budowy (12).

Fig. 3. Middelburg project, the Netherlands, 1986: a) building before dismantling, b) division concept, c) cutting of joints using a special saw, d) storage of dismantled panels at the construction site (12).

Przeanalizujemy dwa wybrane przykłady. W 1986 r. w Middelburg w Niderlandach podjęto decyzję o częściowej rozbiórce 11-piętrowego budynku mieszkalnego wykonanego w technologii wielkopłytowej, który miał jedynie 15 lat (12). Powodem takiej decyzji było niewielkie zasiedlenie mieszkań, wynoszące ok. 30%, z powodów społecznych, które ujawniły się w dużym zespole mieszkalcym. Dlatego zdecydowano się podzielić ten budynek na 3 niższe budynki [5-, 4- i 3-kondygnacyjne]. Budynek przed rozbiórką i koncepcję podziału pokazano na rys. 3 a) i b). Ze względu na duży udział połączeń suchych – tylko wieńce stropowe wymagały przecinania, por. rys. 3 c) – oraz możliwość składowania prefabrykatów z demontażu w miejscu budowy nowego budynku, por. rys. 3 d), projekt nie okazał się trudny od strony technicznej czy logistycznej. Budowa z elementów z odzysku okazała się jednak ponad 19% droższa niż budowa nowego budynku. Wynikało to zapewne z powodu braku doświadczenia kadry, wyższych kosztów precyzyjnej rozbiórki umożliwiającej ponowny montaż oraz konieczności dostosowania elementów do wzniesienia nowego obiektu.

Kolejnym przykładem może być łukowa kładka dla pieszych z bloczków betonowych wykonana w ramach projektu badawczego Re:Crete na Politechnice w Lozannie [rys. 4a]. Bloczki zostały wycięte z konstrukcji monolitycznej, szczeliny między bloczkami zostały wypełnione zaprawą, a łuk betonowy z uwagi na momenty zginające generowane przez obciążenia zmienne został sprężony wewnętrznymi kablami. Na rys. 4 b) pokazano porównanie potencjału tworzenia globalnego ocieplenia GWP [ang. Global Warming Potential] dla kładki i rozwiązań alternatywnych. Wykonanie kładki z bloczków z odzysku okazało się mieć o ok. 70% mniejszy ślad węglowy w porównaniu do najpopularniejszych rozwiązań alternatywnych z betonu monolitycznego z kruszywem z recyklingu czy stali oraz tylko 9% większe niż rozwiązanie z drewna. W tym miejscu warto zaznaczyć, że budownictwo z drewna nie wydaje się konkurencyjnym środowiskowo rozwiązaniem w stosunku do odnawialnej prefabrykacji betonowej z uwagi na ograniczoną do-

favourable, with reported relative cost differences ranging from -30 % to +54 %. It should be noted, however, that prototype solutions without established design or construction procedures are invariably considerably more costly due to the higher associated risk. Therefore, further cost reductions can certainly be expected in this respect.

Let us consider two selected examples. In 1986, a decision was made in Middelburg, the Netherlands, to partially dismantle an 11-storey residential building constructed using large-panel technology, which was only 15 years old (12). The decision was prompted by the low occupancy rate of the apartments, approximately 30 %, resulting from social problems that had emerged within the large residential complex. The building was therefore divided into three lower structures [5-, 4-, and 3-storeys, respectively]. The building prior to dismantling and the concept for its division are shown in Fig. 3a) and b). Owing to the large proportion of dry connections – only the floor-level ring beams required cutting; see Fig. 3c) – and the possibility of storing the dismantled precast elements at the site of the new building; see Fig. 3d), the project did not prove technically or logistically challenging. However, construction using reclaimed elements proved to be more than 19 % more expensive than construction of a new building. This was presumably attributable to the lack of experience among the personnel, higher costs associated with precise dismantling to enable subsequent reassembly, and the need to adapt the elements for the construction of the new building.

Another example is an arched pedestrian footbridge made of concrete blocks, constructed as part of the Re:Crete research project at the Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne [Fig. 4a]. The blocks were cut from a monolithic structure, the joints between the blocks were filled with mortar, and the concrete arch was prestressed using internal tendons to resist the bending moments generated by variable loads. Fig. 4b) presents a comparison of the Global Warming Potential [GWP] of the footbridge with alternative



Rys. 4. Projekt Re:Crete: a) widok łuku z obciążeniem próbnym, b) porównanie GWP dla kładki z bloczków z odzysku i rozwiązań alternatywnych (8).

Fig. 4. Re:Crete project: a) view of the arch during load testing, b) comparison of the GWP of the footbridge constructed from reclaimed blocks and alternative solutions (8).

stępnosc tego surowca oraz kontrowersje co do wyznaczania jego wskaźników środowiskowych (13). Poza tym duża część GWP dla analizowanej kładki związana była z koniecznością zastosowania nowych kabli czy wykonania drewnianej tymczasowej konstrukcji wsporczej.

Analiza powyższych przykładów i pozostałej przywołanej literatury pozwala już na wyciągnięcie ogólnych wniosków.

- Ponowne wykorzystanie całych elementów konstrukcyjnych jest technicznie możliwe do realizacji i ułatwione w przypadku konstrukcji prefabrykowanych.
- Pozwala na znaczną, o kilkadziesiąt procent, redukcję emisji CO₂eq, jednak często okazuje się o kilkanaście procent droższe niż konstrukcje wykonywane w modelu tradycyjnym. Zwiększony koszt wynika przede wszystkim z braku doświadczenia firm projektowych, rozbiórkowych i wykonawczych w zakresie budownictwa cyrkularnego. Ponadto niewielkie zapotrzebowanie na usługi przemysłowego demontażu, pozwalającego na zachowanie odzyskiwanych elementów w jak najlepszym stanie technicznym, istotnie podnosi koszt robót rozbiórkowych.

Analiza przykładu kładki Re:Crete pokazuje, że im większa konieczność modyfikacji elementów z odzysku, tym mniejsza korzyść środowiskowa, większy koszt oraz większy nakład pracy na ponowne zintegrowanie konstrukcji. Dlatego, aby podnieść efektywność środowiskową i kosztową nowych budynków, konieczne jest wdrożenie wspomnianej już strategii „rethink”, tj. projektowania nowych budynków z myślą o ich możliwej rozbiórce lub gruntownej przebudowie [DfD] (14). Podstawową wytyczną formułowaną w literaturze dla tego typu filozofii projektowania jest stosowanie mechanicznych i demontowalnych łączników (15).

solutions. The footbridge constructed from reclaimed blocks was found to have an approximately 70 % lower carbon footprint than the most common alternative solutions based on monolithic concrete with recycled aggregate or steel, and only 9 % higher than the timber solution. It is worth noting here that timber construction does not appear to be an environmentally competitive alternative to renewable precast concrete construction due to the limited availability of this raw material and controversies surrounding the determination of its environmental indicators (13). Furthermore, a substantial proportion of the GWP of the analysed footbridge was associated with the need to use new tendons and construct a temporary timber supporting structure.

Analysis of the above examples and the other literature cited allows several general conclusions to be drawn.

- The reuse of complete structural elements is technically feasible and is facilitated in the case of precast structures.
- It enables a substantial reduction in CO₂eq emissions, by several tens of percent. However, it is often found to be several to over a dozen percent more expensive than structures constructed using the conventional approach. The increased cost is primarily attributable to the lack of experience of design, demolition, and construction companies in circular construction. Furthermore, the limited demand for carefully planned dismantling services, which allow recovered elements to be preserved in the best possible technical condition, significantly increases the cost of demolition works.

Analysis of the Re:Crete footbridge example shows that the greater the need to modify recovered elements, the smaller the environmental benefit, the higher the cost, and the greater the

Może to przyczynić się do ułatwienia pełnego odzyskania i ponownego wykorzystania konkretnego elementu budowlanego jak słup, belka, czy konstrukcyjny element stropowy. Złącza budowlane, oprócz swej funkcji statycznej czyli przekazywania sił węzłowych i dostosowania sposobu ich deformacji do założonego przez projektanta schematu statycznego, powinny też zagwarantować demontowalność i ponowne użycie elementu konstrukcyjnego.

4. Rola złączy w konstrukcjach demontowalnych a projekt CirculCon®.

W przeglądzie dotychczasowych realizacji budownictwa cyrkularnego [10] jako jedno z największych wyzwań technicznych wskazano ograniczoną wiedzę na temat złączy. Jednocześnie podkreślono, że przy realizacji nowych budynków z odzyskanych elementów konstrukcyjnych kluczową rolę odgrywają odpowiednie detale konstrukcyjne. Brak uwzględnienia na etapie projektowania połączeń w budynku, który w przyszłości może być dawcą elementów dla nowego obiektu, może mieć znaczące konsekwencje przy próbie ponownego wbudowania, zwiększając koszt i obciążenia środowiskowe kolejnego cyklu użytkowania.

- Po pierwsze pierwotny obiekt może wymagać znacznie większych nakładów i ingerencji mechanicznej podczas demontażu, zwiększając prawdopodobieństwo uszkodzenia elementu prefabrykowanego.
- Po drugie, łączniki mogą charakteryzować się niedostateczną trwałością skutkującą koniecznością ich wymiany i ponownej istotnej ingerencji w strukturę prefabrykatu.
- W końcu nieprzemysłany projekt wydzielonych elementów może utrudniać transport i ponowne wbudowanie.

Mało efektywny kosztowo i środowiskowo sposób powtórного połączenia prefabrykatów z odzysku pokazano na rys. 5.

Z drugiej strony odpowiednia analiza projektu połączeń w pierwszym cyklu życia prefabrykatu oraz adekwatne regulacje dotyczące modularności konstrukcji mogą sprawić, że materiałochłonność demontowalnych łączników nie ulegnie zmianie w stosunku do obecnie stosowanych rozwiązań. Nie oznacza to jednak, że przy opracowaniu nowej generacji łączników nie istnieje potrzeba dalszych badań. Duża część złączy między elementami prefabrykowanymi wymaga stosowania odpowiednich zapraw wypełniających, aby zapewnić budynkom odpowiednią szczelność oraz zabezpieczyć łączniki przed korozją lub działaniem ognia w sytuacji pożaru. Dlatego rozważyć należy aspekty takie jak:

- metody uzyskania ograniczonej adhezji na styku tych zapraw, łączników i prefabrykatów,
- łatwość ich usunięcia po pierwszym cyklu użytkowania,
- poziom niezawodności i odchyłek wymiarowych łączników po demontażu.

Te i inne wątpliwości ma wyjaśnić projekt CirculCon®. Spektrum konstrukcji i połączeń, które będą rozważane, pokazano na rys. 6.

amount of work required to reintegrate the structure. Therefore, improving the environmental and cost efficiency of new buildings requires implementation of the aforementioned “rethink” strategy, i.e. designing new buildings with their potential future dismantling or major refurbishment in mind [DfD] (14). A fundamental guideline formulated in the literature for this design philosophy is the use of mechanical and demountable connectors (15). This can facilitate the complete recovery and subsequent reuse of individual building elements, such as columns, beams, or structural floor elements. In addition to their structural function, i.e. transferring forces at structural nodes and accommodating their deformation in accordance with the structural system assumed by the designer, building connections should also ensure the demountability and subsequent reuse of structural elements.

4. The role of connections in demountable structures and the CirculCon® project

In a review of existing circular construction projects (10), limited knowledge of structural connections was identified as one of the major technical challenges. At the same time, it was emphasised that appropriate structural details play a key role in the construction of new buildings using reclaimed structural elements. Failure to consider the connections at the design stage of a building that may serve as a source of elements for a future structure can have significant consequences when these elements are subsequently reused, increasing the cost and environmental impacts of the next use cycle.

- First, the original structure may require considerably greater effort and mechanical intervention during dismantling, increasing the likelihood of damage to the precast element.
- Second, the connectors may have insufficient durability, necessitating their replacement and, again, significant intervention in the precast element.
- Finally, an ill-considered design of the individual elements may hinder their transportation and subsequent incorporation into a new structure.

An example of a cost- and environmentally inefficient method of reconnecting reclaimed precast elements is shown in Fig. 5.

On the other hand, an appropriate analysis of the connection design during the first life cycle of a precast element, together with adequate regulations concerning structural modularity, may ensure that the material consumption of demountable connectors does not increase compared with currently used solutions. This does not, however, eliminate the need for further research into the development of a new generation of connectors. A large proportion of connections between precast elements require the use of appropriate filling mortars to ensure adequate building tightness and to protect the connectors against corrosion and the effects of fire. Therefore, aspects such as the following should be considered:

- methods for achieving limited adhesion at the interface between the mortars, connectors, and precast elements;



Rys. 5. Demonstrator pokazujący połączone prefabrykaty z odzysku (16).

Fig. 5. Demonstrator showing interconnected reclaimed precast elements (16).

5. Wyzwania i szanse

5.1. Projektowanie przyszłości

Świadomość możliwości występowania określonych zmian w okresie „życia obiektów budowlanych” może stanowić podstawę do podejmowania właściwych decyzji wobec planowanych inwestycji już na etapie ich projektowania. Proces projektowy, oprócz optymalizacji elementów konstrukcyjnych pod względem materiałochłonności (14), powinien uwzględnić ewentualną konieczność wprowadzenia zmian konstrukcyjnych w obiekcie budowlanym włącznie z przewidywanym planem rozbioru budynku. W przypadku obiektów prefabrykowanych, których konstrukcja składa się ze skończonej liczby rozdzielnych elementów konstrukcyj-

- ease of their removal after the first service life cycle;
- the level of reliability and dimensional deviations of the connectors after dismantling.

These and other issues will be addressed by the CirculCon® project. The range of structural systems and connections to be considered is shown in Fig. 6.

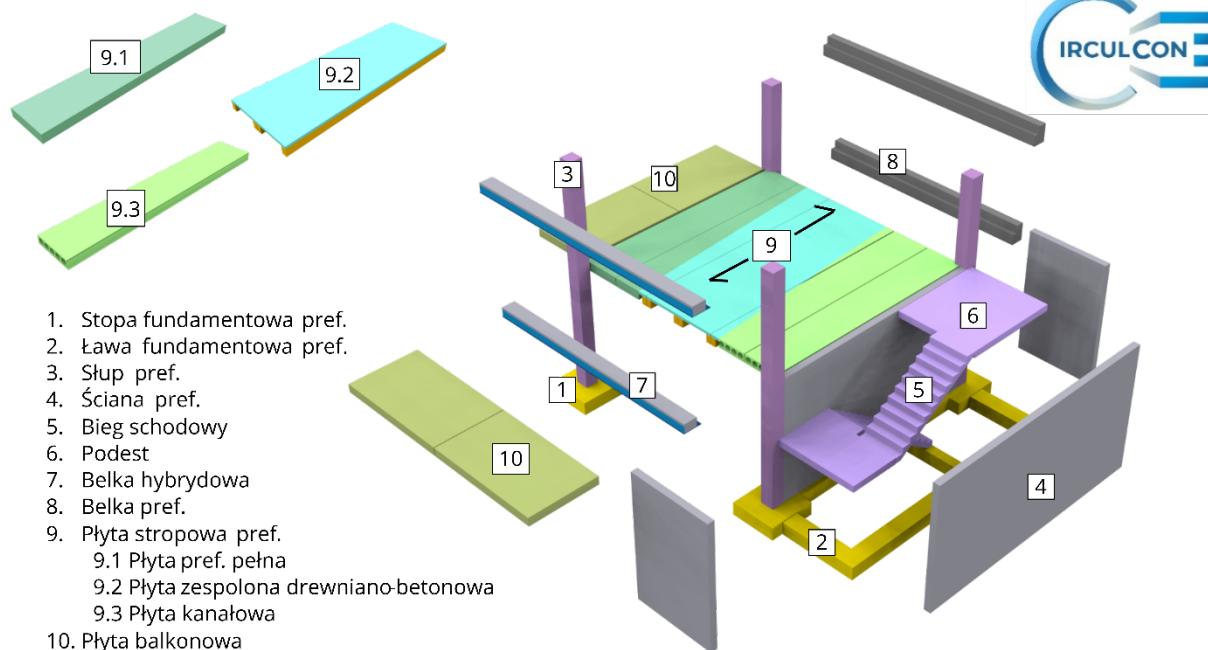
5. Challenges and opportunities

5.1. Designing for the future

Awareness of the potential for specific changes to occur during the life cycle of buildings can provide a basis for making appropriate decisions concerning planned investments as early as the design stage. In addition to optimising structural elements in terms of material consumption (14), the design process should take into account the potential need for structural modifications to the building, including a planned strategy for its eventual dismantling. In the case of precast structures, whose load-bearing systems consist of a finite number of discrete structural elements, this appears to be relatively straightforward to implement within a given project, particularly when BIM technology is used effectively (17).

At the initial stage, the designed structural elements should be analysed in terms of their adaptability to different structural systems, and the parameters related to their design load-bearing capacity and permissible deformation under service loads should be determined.

An important aspect of this process is the structural connections between precast elements, which are responsible for the reliable transfer of forces at the nodes of the load-bearing system. As mentioned above, the configuration of these connections is of key



Rys. 6. Koncepcja demonstratora projektu CirculCon®.

Fig. 6. Concept of the CirculCon® project demonstrator.

nych wydaje się to zadaniem możliwym do prostej implementacji w danym projekcie, szczególnie jeżeli efektywnie wykorzystamy technologię BIM (17).

Na początkowym etapie należy wykonać analizę projektowanych elementów konstrukcyjnych w zakresie ich dostosowania do różnych schematów statycznych; dokonać określenia parametrów związanych z ich nośnością obliczeniową, dopuszczalną deformacją pod obciążeniem eksploatacyjnym.

Istotnym zagadnieniem tego procesu są złącza konstrukcyjne elementów prefabrykowanych odpowiadające za niezawodne przekazywanie sił w punktach węzłowych układu nośnego. Jak już wcześniej wspomniano, ukształtowanie tych złączy ma istotne znaczenie dla możliwości tzw. bezinwazyjnego demontażu fragmentów lub całości konstrukcji prefabrykowanych.

Na etapie projektowania powinna zostać wykonana dodatkowa analiza związana z całkowitym planem demontażu oraz przeznaczeniem demontowanych elementów konstrukcji nośnej [z podziałem na elementy możliwe do wykorzystania w powtórny procesie budowlanym oraz na części konstrukcji podlegające recyklingowi].

5.2. Baza danych elementów prefabrykowanych

W kontekście takiego podejścia do projektowania niezbędna jest zatem wiedza o istnieniu zbiorów elementów konstrukcyjnych w rejonie planowanego przedsięwzięcia inwestycyjnego. Transport zdemontowanych prefabrykatów na dalsze odległości znacząco obniża korzyści środowiskowe i ekonomiczne (2). Dostęp do odpowiednio przygotowanej bazy danych w tym aspekcie wydaje się kluczowy (4). Wykorzystywanie elementów konstrukcyjnych pozostałych po demontażu części lub całych obiektów konstrukcyjnych może być ułatwione poprzez przyjęcie jednolitych zasad ich opisywania. Informacje o prefabrykacie powinny również zawierać dane odnośnie miejsca „pracy” elementu w poprzedniej konstrukcji wraz z pierwotnym schematem statycznym, dla którego został zaprojektowany. Ważna jest również informacja o możliwości wykonania połączenia prefabrykatu z innymi elementami konstrukcji oraz dane dotyczące wbudowanych w element akcesoriów łączących i kotwiących. Pomocna może być informacja o stanie uchwytów transportowych i ewentualnej możliwości ich powtórnego wykorzystania. Niezbędne są również dane związane z dokonaniem oceny technicznej elementu po demontażu, według uprzednio przyjętych i uregulowanych odpowiednimi przepisami zasad oceny (9). Oprócz dokumentacji fotograficznej prezentującej stan estetyczny elementu potrzebna jest również informacja o jego położeniu i miejscu składowania. Baza danych elementów konstrukcyjnych może również zawierać tzw. wycenę referencyjną prefabrykatów, pomocną projektantowi do oszacowania kosztów przyszłej konstrukcji.

4.3. Efektywność ekonomiczna

Wykorzystanie zdemontowanych elementów konstrukcyjnych przy założeniu istotnej różnicy cenowej względem adekwatnych nowo produkowanych prefabrykatów (z uwzględnieniem odpowiednich

importance for the possibility of so-called non-invasive dismantling of individual sections or entire precast structures.

At the design stage, an additional analysis should be carried out covering the complete dismantling plan and the intended use of the dismantled load-bearing structural elements [distinguishing between elements suitable for reuse in subsequent construction processes and structural components intended for recycling].

5.2. Database of precast elements

In the context of such an approach to design, it is therefore necessary to have information on the availability of structural element inventories in the vicinity of a planned construction project. Transporting dismantled precast elements over long distances significantly reduces the environmental and economic benefits (2). Access to an appropriately structured database therefore appears to be crucial (4). The reuse of structural elements remaining after the dismantling of parts of or entire structures could be facilitated by adopting uniform principles for their description and classification.

Information on a precast element should also include data on its position and function in the previous structure, together with the original structural system for which it was designed. Information concerning the possibility of connecting the precast element to other structural components is also important, as are data on connecting and anchoring accessories incorporated into the element. Information on the condition of lifting devices and the possibility of their subsequent reuse may also be useful.

Data related to the technical assessment of the element after dismantling are also essential, based on previously established assessment principles regulated by appropriate provisions (9). In addition to photographic documentation showing the aesthetic condition of the element, information on its location and storage site is also required. The structural element database may also include so-called reference pricing for precast elements, which can assist designers in estimating the cost of a future structure.

5.3. Economic efficiency

The use of dismantled structural elements, provided that there is a significant price difference compared with equivalent newly manufactured precast elements, including the associated costs of transporting them to the construction site, offers tangible economic benefits to the investor by reducing structural costs. For the investor of the original building, this process is also economically beneficial, as it eliminates the need to recycle the precast element, which would involve additional costs. It also provides an opportunity to resell the element, with costs limited to its transportation to a storage facility and, where necessary, subsequent storage. Both parties to such a transaction therefore have the opportunity to obtain tangible financial benefits. A precast element manufacturer anticipating the possibility of its subsequent reuse in another building can achieve a significantly more favourable product assessment in terms of its carbon footprint and thus an indirect benefit resulting from an improved competitive position when tendering for contracts.

kosztów transportu na plac budowy) niesie ze sobą dla inwestora konkretne korzyści ekonomiczne, wpływające na obniżenie kosztów konstrukcji. Dla inwestora pierwotnego obiektu realizacja tego procesu jest również opłacalna, ponieważ eliminuje potrzebę wykonania recyklingu użytego prefabrykatu wiążącego się z dodatkowymi kosztami. Daje mu również możliwość odsprzedaży elementu z poniesieniem kosztów jedynie jego transportu na miejsce składowania i ewentualnego magazynowania. Obie strony tej transakcji mają zatem szansę na uzyskanie konkretnych korzyści finansowych. Producent elementów prefabrykowanych, przewidując możliwość ich powtórnego wykorzystania w innym obiekcie, uzyskuje istotnie lepszą ocenę dla wyrobu w aspekcie tzw. śladu węglowego, a więc pośrednią korzyść wynikającą z lepszej pozycji przetargowej w ubieganiu się o zlecenie.

Wykorzystywanie elementów prefabrykowanych w obiegu zamkniętym nie wpłynie na obniżenie zapotrzebowania na nowo produkowane elementy w najbliższym stuleciu. Nie występuje zatem zagrożenie egzystencjalne dla przemysłu prefabrykacji. Ewentualne powstanie ruchu protestu porównywalnego z ruchem niszczycieli maszyn w tzw. rewolucji przemysłowej jest raczej wykluczony. To stwierdzenie oparte jest bowiem na długoletnich analizach wskazujących na wzrastający udział technologii prefabrykacji przy wznoszeniu obiektów budowlanych względem pozostałych technik. Prawdopodobieństwo istotnej skali zastąpienia elementów produkowanych w okresie wznoszenia obiektów przez elementy zdemontowane jest znikome. Natomiast zwiększenie udziału prefabrykatów dostosowanych do demontażu przy wznoszeniu nowych konstrukcji jest zjawiskiem pozytywnym nie tylko pod kątem ekonomicznym, ale również w aspekcie zrównoważonego rozwoju i ochrony środowiska. Warto również zwrócić uwagę na potencjał budownictwa cyrkularnego do wykreowania nowego segmentu rynku związanego z oceną prefabrykatów, ich demontażem, transportem czy regeneracją.

6. Podsumowanie

Odpowiedzialność za rozwój i przyszłość kolejnych pokoleń wymaga podejmowania świadomych decyzji, związanych z wykorzystywaniem do wznoszenia nowych obiektów budowlanych w pierwszej kolejności istniejących elementów konstrukcyjnych dostępnych i gotowych do powtórnego zastosowania.

Powtórne wykorzystanie prefabrykatu rodzi ze sobą wiele dodatkowych korzyści dla otaczającego nas środowiska. Technologia prefabrykacji ma szansę stać się rozwiązaniem wiodącym pod względem minimalizacji obciążenia środowiskowego, zarówno dzięki minimalnej objętości elementów konstrukcyjnych potrzebnych do zrealizowania zamierzonego układu, jak i dzięki możliwości ponownego wykorzystania tych elementów po zakończeniu okresu użytkowania obiektu.

The use of precast elements in a closed-loop system will not reduce the demand for newly manufactured elements over the coming century. Consequently, there is no existential threat to the precast construction industry. The emergence of a protest movement comparable to the machine-breaking movement during the Industrial Revolution can therefore be regarded as highly unlikely. This statement is supported by long-term analyses indicating the increasing share of precast technology in building construction compared with other construction methods. The likelihood of newly manufactured elements being replaced on a significant scale by dismantled elements during the construction of new buildings is negligible. Increasing the share of precast elements designed for disassembly in new structures is, however, a positive development, not only from an economic perspective but also in terms of sustainable development and environmental protection. It is also worth noting the potential of circular construction to create a new market segment involving the assessment, dismantling, transportation, and refurbishment of precast elements.

6. Conclusions

Responsibility for the development and future well-being of subsequent generations requires informed decisions concerning the use of existing structural elements that are available and ready for reuse as the first choice when constructing new buildings.

The reuse of precast elements provides numerous additional benefits for the surrounding environment. Precast technology has the potential to become a leading solution in terms of minimising environmental impact, both through the minimal volume of structural elements required to achieve the intended structural system and by enabling their subsequent reuse in the construction of further buildings.

Literatura / References

1. S. Huuhka, C. Naber, C. Asam, C. Caldenby, Architectural Potential of Deconstruction and Reuse in Declining Mass Housing Estates. *Nord. J. Archit. Res.* **31**, 1, 145-181 (2019).
2. C. Küpfer, C. Fivet, Structural component reuse of precast and cast-in-place reinforced concrete in architecture since the late 1960s in Europe. W: S. Holzer, S. Langenberg, C. Knobling, O. Kasap (eds.), *Construction Matters: Proceedings of the 8th International Congress on Construction History*, vdf Hochschulverlag AG, Zürich, 1077-1084 (2024). <https://doi.org/10.3218/4166-8>
3. G. Piątek, *Najlepsze miasto świata. Warszawa w odbudowie 1944-1949*. Wydawnictwo W.A.B., Warszawa (2020).
4. L.C.M. Eberhardt, A. van Stijn, F.N. Rasmussen, M. Birkved, H. Birgis-dottir, Development of a Life Cycle Assessment Allocation Approach for Circular Economy in the Built Environment. *Sustainability* **12**, 22, 9579 (2020). <https://doi.org/10.3390/su12229579>
5. J. Devènes, M. Bastien-Masse, C. Fivet, Reusability assessment of reinforced concrete components prior to deconstruction from obsolete buildings. *J. Build. Eng.* **84**, 108584 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108584>
6. U. Dechantsreiter, P. Horst, A. Mettke, S. Asmus, S. Schmidt, F. Knappe, J. Reinhardt, S. Theis, J.J. Lau, Instrumente zur Wiederverwendung von Bauteilen und hochwertigen Verwertung von Baustoffen, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau (2015), Texte 93/2015, UBA-FB 002208.
7. B. Matthews, J. Hernández Vargas, M. Vullings, A. Dervishaj, P. Jonker-Hoffrén, L. Alkki, S. Wijte, Toward complete circular reuse: A database system for reclaimed precast concrete elements. *Autom. Constr.* **188**, 106983 (2026). <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2026.106983>
8. J. Devènes, J. Brütting, C. Küpfer, M. Bastien-Masse, C. Fivet, Re:Crete – Reuse of concrete blocks from cast-in-place building to arch footbridge. *Struct.* **43**, 1854-1867 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.is-truc.2022.07.057>
9. Standard Norge, NS 3682:2022 Huldekker av betong til ombruk – Krav til dokumentasjon for gjenbruk, Standard Norge, Lysaker (2022).
10. C. Küpfer, M. Bastien-Masse, C. Fivet, Reuse of concrete components in new construction projects: Critical review of 77 circular precedents. *J. Clean. Prod.* **383**, 135235 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135235>
11. K. Ostapska, R. Hingorani, W. Teclaw, F. Kaufmann, K. Gradedi, P. Rütther, Automated robotic deconstruction sequence planning from scan-to-BIM data for reinforced concrete structure reuse. *Autom. Constr.* **180**, 106548 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106548>
12. J. Kristinsson, Ch.F. Hendriks, T. Kowalczyk, B.J.H. te Dorsthorst, Reuse of secondary elements: Utopia or reality. W: *Proceedings of the CIB World Building Congress*, paper NOV 55, Wellington, New Zealand (2001).
13. H. Hafez, A.T.M. Marsh, M. Flegar, L. Peng, K.L. Scrivener, Low-carbon concrete has the potential to meet global urban housing needs by 2050. *Commun. Sustain.* **1**, 28 (2026). <https://doi.org/10.1038/s44458-025-00027-1>
14. B. Kromoser, P. Gappmaier, I. Ahmed, S. Reichenbach, Circular economy in concrete construction through modular construction, automated design and production of structurally optimised reusable concrete building components. *Case Stud. Constr. Mater.* **23**, e05139 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05139>
15. K. Ostapska, P. Rütther, A. Loli, K. Gradedi, Design for Disassembly: A systematic scoping review and analysis of built structures Designed for Disassembly. *Sustain. Prod. Consum.* **48**, 377-395 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.05.014>
16. Ein zweites Leben für Betonbauteile [online], Baunetz Wissen (2026) [dostęp: 09.07.2026]. Dostępny w Internecie: <https://www.baunetzwissen.de/integrales-planen/tipps/forschung/ein-zweites-leben-fuer-betonbauteile-7957138>
17. K. Protchenko, Technologia BIM w prefabrykacji. *Mater. Bud.* **10**, 22-23 (2020).