

# CYRKULARNE I NISKOEMISYJNE MATERIAŁY BUDOWLANE

Autorzy:

Janez Turk,

Tajda Potrč Obrecht,

Katja Malovrh Rebec,

Patricija Ostruh



Grudzień 2023

# CirCon4Climate

Niniejsza publikacja została opracowana jako jedno z działań w ramach projektu CirCon4Climate. Projekt ten jest częścią Europejskiej Inicjatywy Klimatycznej (EUKI) niemieckiego Federalnego Ministerstwa Gospodarki i Klimatu (BMWK).

Supported by:



Federal Ministry  
for Economic Affairs  
and Climate Action



European  
Climate Initiative  
EUKI

on the basis of a decision  
by the German Bundestag

Tytuł:	Cyrkularne i niskoemisyjne materiały budowlane
Podtytuł:	
Wersja:	1.1
Data:	11.12.2023
Authorzy:	Janez Turk, Tajda Potrč Obrecht, Katja Malovrh Rebec, Patricija Ostruh
Osoba kontaktowa:	Janez Turk janez.turk@zag.si
Institucja:	Slovenian National Building and Civil Engineering Institute (ZAG)   Dimičeva ulica 12, 1000 Ljubljana   Słowenia   <a href="https://www.zag.si/">https://www.zag.si/</a>

# Spis treści

<b>1.</b>	<b>Wprowadzenie do cyrkularnych i niskoemisyjnych materiałów budowlanych</b>	<b>4</b>
1.1.	Cel przewodnika	6
<b>2.</b>	<b>Materiały cyrkularne</b>	<b>7</b>
2.1.	Rodzaje recyklingu	9
<b>3.</b>	<b>Materiały o niskim śladzie węglowym</b>	<b>10</b>
3.1.	Możliwe sposoby produkcji wyrobów o niskim śladzie węglowym	11
3.1.1.	Użycie alternatywnych materiałów	12
3.1.2.	Użycie wtórnych materiałów	12
3.1.3.	Wykorzystanie naturalnych (biopochodnych) materiałów	14
3.1.4.	Wykorzystanie lokalnych materiałów	14
3.1.5.	Zwiększenie wydajności	15
3.1.6.	Integracja energii odnawialnej	15
3.1.7.	Inne podejścia	15
<b>4.</b>	<b>Przykładowa lista cyrkularnych i niskoemisyjnych wyrobów budowlanych</b>	<b>17</b>
4.1.	Drewno konstrukcyjne	20
4.2.	Beton	20
4.3.	Cegła	22
4.4.	Stal	23
4.5.	Geopolimery	23
4.6.	Asfalt z recyklingu	24
4.7.	Ziemia z wykopów	25
4.8.	Inne niskoemisyjne wyroby budowlane	25
4.9.	Studium przypadków: konstrukcje oparte na materiałach cyrkularnych i niskoemisyjnych	26
<b>5.</b>	<b>Ocena cyklu życia</b>	<b>28</b>
<b>6.</b>	<b>Podsumowanie i wnioski</b>	<b>31</b>
<b>7.</b>	<b>Bibliografia</b>	<b>32</b>
	Lista rysunków	36
	Lista tabel	36

# 1. Wprowadzenie do cyrkularnych i niskoemisyjnych materiałów budowlanych

Popularyzacja ekologicznie zrównoważonych produktów wzbudziła zainteresowanie materiałami opartymi na biotechnologii, materiałami z zawartością surowców wtórnych oraz korzyściami płynącymi z wykorzystania w nich odpadów. Z punktu widzenia środowiska, materiały zrównoważone ekologicznie to te o minimalnej ilości wbudowanego śladu węglowego (ang. *embodied carbon aka embodied energy*). Wbudowany ślad węglowy w materiały budowlane odnosi się do całkowitej ilości zużytej energii w trakcie cyklu życia danego materiału. Obejmuje to energię potrzebną do wydobycia surowców, produkcji, transportu, budowy, konserwacji, oraz utylizacji lub recyklingu na końcu jego życia. Aby podążać drogą materiałów zrównoważonych ekologicznie, w tym niskoemisyjnych materiałów budowlanych, branża musi priorytetyzować optymalizację istniejących ekologicznie zrównoważonych technologii. Dodatkowo istnieje potrzeba eksploracji nowych technologii, optymalizacji konwencjonalnych metod, integracji technologii niszowych w powszechne praktyki, przyspieszenia adaptacji technologii hybrydowych oraz zastosowań bio- i nanotechnologii.

Niemniej jednak znaczna redukcja lub radykalne odejście od konwencjonalnych materiałów stosowanych na masową skalę jest mało prawdopodobne w perspektywie krótko- i średnio-terminowej. Nowe trendy pojawiają się w materiałach izolacyjnych, odchodzeniu od wyrobów ceramicznych, zmniejszeniu użycia cynku i miedzi na rzecz PVC i innych tworzyw sztucznych w instalacjach sanitarnych, stosowaniu materiałów biokompozytowych oraz zwiększeniu wykorzystania materiałów z recyklingu, zwłaszcza w betonie, stali i wyrobów z aluminium (Van Wyk et al., 2012).

Dla całej branży budowlanej, a w szczególności dla producentów materiałów budowlanych, konieczne jest zidentyfikowanie ograniczeń środowiskowych związanych z obecną i przyszłą produkcją czy zużyciem materiałów. Równie istotne jest rozpoznanie technologicznych możliwości radzenia sobie z tymi wyzwaniami.

Należy skoncentrować się na wpływie na środowisko (nie ograniczając się do potencjału globalnego ocieplenia) materiałów wykorzystanych w procesie produkcji (wydobycie, zużycie energii i wody) oraz postępowaniach na końcu życia wyrobów (gospodarowanie odpadami i recykling). W niektórych przypadkach, faza użytkowania może dominować w ogólnych wpływach środowiskowych cyklu życia produktu ze względu na ciągłe zużycie energii i/lub materiałów w trakcie użytkowania, jak to ma miejsce na przykład w budynkach (eksploatacja, konserwacja, naprawa).

Kluczowym podejściem do rozwiązania tego problemu było zastosowanie strategii związanych z efektywnością energetyczną, które okazały się skuteczne, zwłaszcza w odniesieniu do konstrukcji pozbawionych regulacji dotyczących zużycia energii. Obecnie najbardziej ambitne modernizacje dążą do osiągnięcia standardu budynków o niemal zerowym zużyciu energii (ang. *Nearly Zero Energy Building*), który stał się punktem odniesienia dla nowo powstających budynków w Europie. Jednak w miarę malejącego operacyjnego zapotrzebowania na energię i włączanie systemów energii odnawialnej do budynków, obciążenia środowiskowe budynków ulegają przesunięciu z fazy eksploatacji na etap budowy, na przykład na materiały budowlane, biorąc pod uwagę ich wbudowany ślad węglowy.

Integracja zasad gospodarki o obiegu zamkniętym ma potencjał znacznego zmniejszenia emisji związanych z wbudowanym śladem węglowym w materiały budowlane, o czym

świadczy wiele projektów finansowanych przez UE, których celem jest osiągnięcie redukcji o 50%. Ta kwestia jest szczególnie istotna ze względu na znaczący udział sektora budowlanego, który odpowiada za ponad 40% zużycia energii pierwotnej w Europie i aż 36% europejskiego śladu węglowego (Eurostat, 2020). Przykłady wartości ‘wbudowanego śladu węglowego’ w różne materiały budowlane przedstawiono w Tabeli 1.

Aby promować redukcję śladu węglowego budynków, Unia Europejska wydała różne inicjatywy, strategie i dyrektywy, w tym Dyrektywę dotyczącą Efektywności Energetycznej Budynków (EPBD), Dyrektywę dotyczącą Efektywności Energetycznej (EED), Dyrektywę dotyczącą Gospodarki Odpadami, Dyrektywę dotyczącą Zamówień Publicznych Produktów Zielonych (GPP), Dyrektywę dotyczącą Ekorozwoju, Dyrektywę dotyczącą Taksonomii czy system Level(s).

W kontekście cyrkularnych i niskoemisyjnych materiałów budowlanych, warto podkreślić rolę cyrkularnych zamówień publicznych. Stanowią one instrument polityki służący osiągnięciu celów dotyczących jakości środowiska. Celem tego narzędzia jest wykorzystanie popytu jako dźwigni, ułatwiającej i przyspieszającej przejście od gospodarki liniowej do gospodarki o obiegu zamkniętym. Cyrkularne zamówienia publiczne odgrywają kluczową rolę w promowaniu sektora zrównoważonego budownictwa w aspekcie środowiskowym. **Więcej informacji na temat cyrkularnych zamówień publicznych można znaleźć w dokumencie “Przewodnik dotyczący Cyrkularnych Zamówień Publicznych”.**

Niniejszy przewodnik skupia się na koncepcji obiegu zamkniętego na poziomie materiałów, podczas gdy koncepcję obiegu zamkniętego na poziomie całego budynku została omówiona w przewodniku zatytułowanym **“Strategie Budownictwa Cyrkularnego”**. Wspomniany przewodnik oferuje wgląd w zasady projektowania budynków z perspektywy obiegu zamkniętego, obejmując projektowanie pod kątem demontażu, adaptowalności, rekonfiguracji oraz możliwości przekształceń przestrzennych. Dodatkowo, przedstawia przegląd potencjalnych narzędzi do analiz obiegu zamkniętego.

Ponieważ niskoemisyjne wyroby budowlane często zawierają w swoim składzie materiały z recyklingu, zachęca się do zapoznania z powiązaniem dokumentem pt. **“Bezpieczne stosowanie wtórnych materiałów budowlanych. Pakiet informacyjny dla producentów”** w którym opisane są wymagania techniczne i środowiskowe stawiane wyrobom budowlanym wprowadzanym do obrotu.

Tabela 1: Wbudowany ślad węglowy w różne materiały budowlane (źródło: Calkins, 2009).

Materiał budowlany	Wbudowany ślad węglowy (kg CO <sub>2</sub> /tona)
Wapień	12
Żwir	16
Ziemia ubijana w szalunkach	24
Cementogrunty	140
Beton niezbrojony (wytrzymałość 20 MPa)	134
Beton zbrojony stalą	222
Drewno iglaste	132
Cement portlandzki z dodatkiem 64–73% żużla	279
Cement portlandzki z dodatkiem 25–35% popiołów lotnych	858
Granit	317
Cegła inżynierska / techniczna	850
Płytki ceramiczne, kafelki	430
Stal, pręt i drut	1720
Polipropylen formowany wtryskowo	3900

## 1.1. Cel przewodnika

Niniejszy przewodnik ma na celu podsumowanie istniejącej wiedzy na temat niskoemisyjnych materiałów budowlanych i strategii związanych z gospodarką o obiegu zamkniętym, które mogą złagodzić wpływ systemów i komponentów budowlanych na środowisko. Przewodnik jest przeznaczony dla producentów materiałów budowlanych, osób zarządzających odpadami, inwestorów publicznych i innych interesariuszy związanych z sektorem budowlanym. Mając na uwadze informacje przedstawione w przewodniku, zainteresowane strony mogą przyczynić się do uczynienia sektora budowlanego bardziej zrównoważonym środowiskowo. Czyniąc to, odgrywają kluczową rolę w osiągnięciu celów klimatycznych określonych w porozumieniu paryskim i ułatwianiu przejścia na gospodarkę o obiegu zamkniętym.

## 2. Materiały cyrkularne

Strategia gospodarki o obiegu zamkniętym dla materiałów budowlanych opiera się na wieloaspektowym podejściu. Główny nacisk kładzie się na rozwój nowych materiałów i zaawansowanych metod budowlanych, mających na celu poprawę wydajności i trwałości budynków przy jednoczesnym minimalizowaniu ilości odpadów. Materiały budowlane o ujemnym bilansie węglowym umożliwiają długoterminową sekwestrację węgla, a także poprawę ich wydajności i trwałości. Zaawansowane metody budowlane wykorzystują nowe materiały, jednocześnie zmniejszając ogólne zużycie materiałów i zwiększając potencjał ich ponownego wykorzystania.

Materiały o obiegu zamkniętym są projektowane tak, aby umożliwić całkowity recykling materiałów i zastosowanie nowoczesnych strategii przetwarzania wolnych od toksycznych produktów ubocznych w czasie regeneracji surowców. Materiały o obiegu zamkniętym powinny być przetwarzane w pierwszej kolejności na poziomie lokalnym, zgodnie z lokalnymi potrzebami. Stosowanie materiałów o obiegu zamkniętym w budownictwie opiera się na zasadach maksymalizacji wykorzystania materiałów pierwotnych i biomateriałów, maksymalizacji potencjału ponownego użycia oraz ilości materiałów pochodzących z recyklingu. W 2021 roku oszacowany wskaźnik materiałów o obiegu zamkniętym w Unii Europejskiej wyniósł 11.7% (Andabaka, 2023), co oznacza, że nadal istnieje potrzeba znacznych ulepszeń.

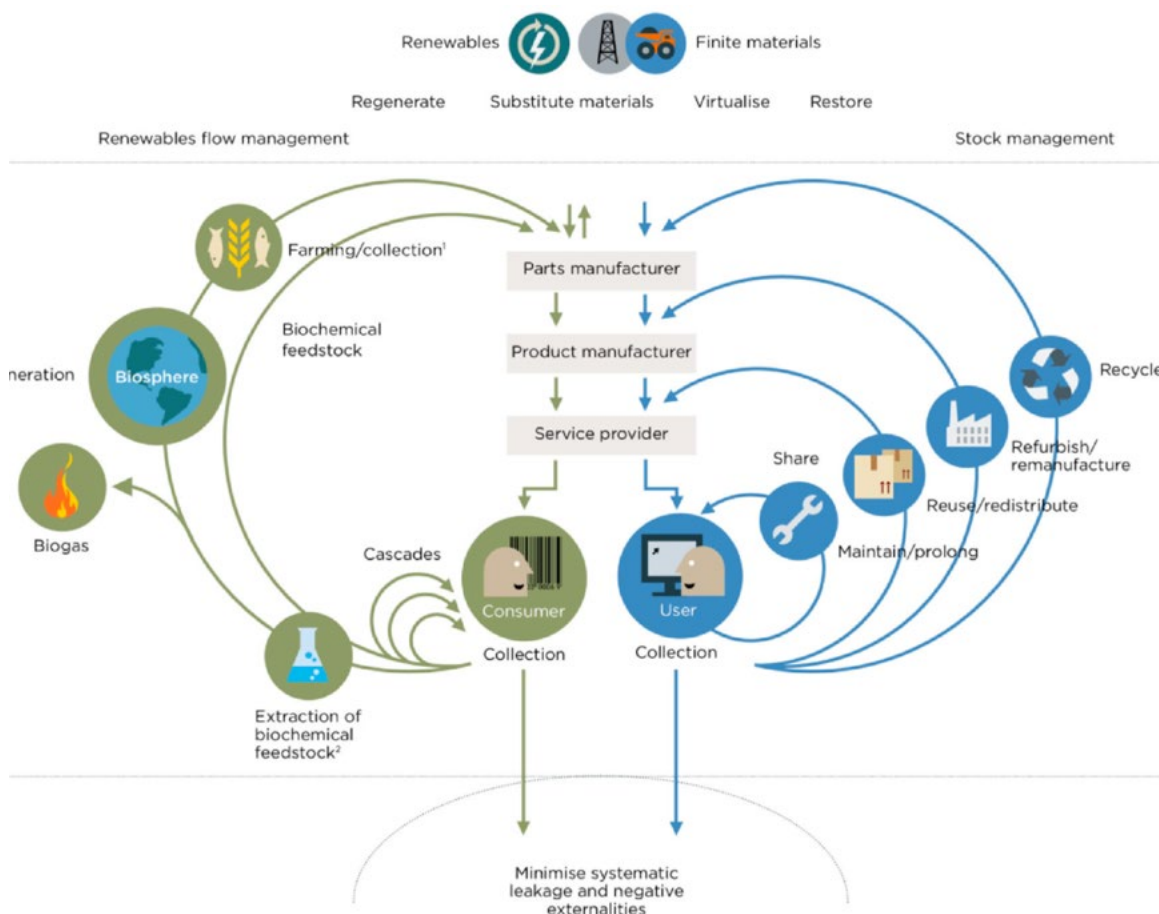
Celem jest zapewnienie przepływów materiałów w zamkniętej pętli, które stanowią podstawę gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ). W ten sposób minimalizuje się ilość odpadów, a materiały są ponownie wykorzystywane, poddawane recyklingowi lub ponownie wykorzystywane po zakończeniu ich okresu użytkowania.

Gospodarka o obiegu zamkniętym to model ekonomiczny, który ma na celu optymalizację wykorzystania zasobów w ramach granic planety, maksymalizację wartości aktywów w gospodarce oraz minimalizację odpadów poprzez zamknięcie obiegów ekonomicznych (Rysunek 1). Gospodarka o obiegu zamkniętym postrzega ogół wartości ekonomicznej w perspektywie długoterminowej, czyli uwzględnia koszty wszystkich czynników zewnętrznych (środowiskowych, społecznych, itp.) oraz zdyskontowaną wartość aktywów w całym cyklu ich życia. GOZ można zdefiniować jako system zaprojektowany w celu odbudowy i regeneracji. Ma on na celu zastąpienie koncepcji utylizacji „końca życia” odpadów jego regeneracją, priorytetem dla energii odnawialnej, eliminacją toksycznych substancji chemicznych utrudniających ponowne użycie oraz dążeniem do eliminacji odpadów poprzez doskonałe projektowanie materiałów, wyrobów, systemów czy modeli biznesowych.

Gospodarka o obiegu zamkniętym to podejście mające na celu zwiększenie zrównoważonego rozwoju polegające na stopniowym odchodzeniu działalności gospodarczej od konsumpcji ograniczonych zasobów oraz eliminacji odpadów z systemu (Rysunek 1).

Cele podejścia gospodarki o obiegu zamkniętym obejmują zwiększenie okresu użytkowania wyrobów, ułatwianie przekształcania ich na nowe zastosowania oraz zwracanie materiałów odpadowych z wysypisk z powrotem na linie produkcyjne. W dłuższej perspektywie takie podejście prowadzi do bardziej racjonalnego projektowania wyrobów, które mogą być łatwo rozmontowane na podstawowe elementy przydatne do ponownego wykorzystania lub recyklingu.

Rysunek 1: Tzw. 'motyli diagram' gospodarki o obiegu zamkniętym.



Źródło: Fundacja Ellen MacArthur (2013)

Producenci są zobligowani do projektowania wyrobów zgodnie z wymaganiami zrównoważonego rozwoju. Można to osiągnąć poprzez opracowywanie trwalszych rozwiązań (ang. *design for durability*) oraz zapewnienie, że koncepcja wyrobu uwzględnia zmianę przeznaczenia, możliwość ponownego wykorzystania, demontaż czy recykling użytych materiałów.

Na poziomie budynków, obiekty budowlane muszą być projektowane, wykonywane i demontowane w taki sposób, aby korzystanie z zasobów naturalnych było zrównoważone i zapewniało w szczególności: ponowne wykorzystanie lub recykling struktur budynków i obiektów niemieszkalnych oraz materiałów i elementów porozbiórkowych, gwarantując tym samym trwałość konstrukcji budowlanych.

Projektowanie o obiegu zamkniętym umożliwia tworzenie zrównoważonego środowiska budowlanego, czyniąc budynki bardziej adaptowalnymi i ułatwiając ponowne wykorzystanie wartościowych materiałów i wyrobów budowlanych po zakończeniu ich użytkowania. Odwracalny projekt budynku to projekt budynku, który można łatwo rozebrać lub części którego można łatwo usunąć, koncentrując się w ten sposób na ich przyszłym wykorzystaniu. Różne warstwy, takie jak okna, podłogi, ściany wewnętrzne i wentylacja, mogą być dostępne bez uszkodzania innych części budynku, umożliwiając ich efektywną naprawę, wymianę, ponowne wykorzystanie czy odzyskiwanie.

Zasady gospodarki o obiegu zamkniętym, przedstawione w Planie Działania dotyczącym Gospodarki O Obiegu Zamkniętym UE z 2020 roku oraz stanowiące istotny element Europejskiego Zielonego Ładu z 2019 roku, czerpią inspirację z hierarchii postępowania z od-



padami określonej w ramach Dyrektywy ramowej UE w sprawie odpadów (2008/98/WE). Ta hierarchia kategoryzuje podejścia do zarządzania materiałami na końcu ich cyklu życia, ze szczególnym naciskiem na zachowanie ich wartości ekonomicznej na rynku, tam gdzie jest to wykonalne i optymalne pod względem środowiskowym. Przede wszystkim postawiono na zapobieganie powstawaniu odpadów, a następnie na ponowne wykorzystanie, recykling, odzysk i utylizację (np. składowanie), co jest najmniej preferowaną opcją. Bezpośrednie ponowne wykorzystanie komponentów budowlanych wyróżnia się jako najbardziej ekologicznie atrakcyjne rozwiązanie, chociaż jego praktyczność może być ograniczona w dobie masowej produkcji (Stahel i MacArthur, 2019).

Z drugiej strony, ponowne wykorzystanie odpadów mineralnych, głównego składnika gruzu budowlanego i rozbiórkowego, zazwyczaj wiąże się z operacjami zasypywania wyrobisk, które nie przyczyniają się znacząco do utrzymania wartości ekonomicznej tych materiałów na rynku. Podnoszone w literaturze obawy dotyczą stosowania materiałów o dużej zawartości materiałów pochodzących z recyklingu i są powiązane ze wzrostem kosztów końcowych uzyskania równoważnych właściwości mechanicznych betonu, zmniejszeniem urobialności oraz bliskością źródeł odpadów z budowy i rozbiórki. **Więcej informacji na temat materiałów wtórnych można znaleźć w przewodniku „Bezpieczne wykorzystanie wtórnych materiałów budowlanych. Pakiet informacyjny dla producentów”.**

## 2.1. Rodzaje recyklingu

Istnieją dwa główne podejścia do recyklingu. Mówiąc ogólnie, **recykling w obiegu zamkniętym** zachodzi, gdy odpady są używane do produkcji podobnych wyrobów (grup wyrobów) w ramach firm produkcyjnych, dzięki czemu proces recyklingu może być powtarzany wielokrotnie. Z kolei, recykling w obiegu otwartym występuje, gdy odpady trafiają do przedsiębiorstw zajmujących się obrotem odpadami i są wykorzystywane przez nieznaną stronę.

Recyklingu w obiegu otwartym i zamkniętym nie należy mylić z „upcyclingiem” i „downcyclingiem”. Upcycling polega na przywróceniu surowca do jego pierwotnej jakości lub nawet wyższej. Downcycling polega na wykorzystaniu odpadu w jego obecnym stanie.

### 3. Materiały o niskim śladzie węglowym

W skali globalnej, sektor budowlany jest odpowiedzialny za 36% wszystkich emisji gazów cieplarnianych, około 40% całkowitego zużycia materiałów oraz 40% wszystkich odpadów (Wouterszoon Jansen et al., 2022). Budowa i eksploatacja budynków odgrywają kluczową rolę w osiąganiu celów Porozumienia Paryskiego, które zakładają ograniczenie wzrostu średnich temperatur na świecie poniżej 2°C i osiągnięcie neutralności pod względem emisji gazów cieplarnianych netto w drugiej połowie dwudziestego pierwszego wieku (do 2050 roku). Dodatkowo Komisja Europejska wprowadziła Zielony Ład z kilkoma propozycjami ograniczenia emisji gazów cieplarnianych netto o co najmniej 55% do 2030 roku w porównaniu z poziomem z 1990 roku oraz zapewnienia neutralności klimatycznej Unii Europejskiej do 2050 roku.

W ostatnich dziesięcioleciach operacyjne zużycie energii w budynkach niskoenergetycznych uległo znacznemu zmniejszeniu. W konsekwencji tego, emisje gazów cieplarnianych z materiałów budowlanych używanych w budownictwie mogą stanowić około połowy całkowitego śladu węglowego w całym cyklu życia budynku. Ten problem można rozwiązać poprzez produkcję materiałów budowlanych o niskim śladzie węglowym i wdrażanie zasad gospodarki o obiegu zamkniętym, co prowadzi do znacznej redukcji emisji gazów cieplarnianych.

Aby budynki uzyskały satysfakcjonujące wartości śladu węglowego, znaczące ilości CO<sub>2</sub> musiałyby zostać wychwycone z atmosfery, a ilość zgromadzonego węgla musiałaby być większa niż emisje związane z pozyskiwaniem, produkcją i transportem wszystkich materiałów używanych do budowy. W tym celu w sektorze budowlanym wprowadzono technologie takie jak bioenergia z wychwyтaniem i składowaniem dwutlenku węgla. Dwutlenek węgla z atmosfery może być przechowywany w materiałach budowlanych dwoma sposobami: trwałym sekwestrowaniem w materiałach mineralnych i tymczasowym przechowywaniem w materiałach biogenicznych.

Główne strategie mające na celu zmniejszenie poziomu wbudowanego śladu węglowego w budynku, a co za tym idzie, w materiały budowlane, zostały wymienione poniżej:

1. Projektowanie pod kątem **trwałości** (np. długowieczność materiałów - dłuższe użytkowanie materiałów)
2. Projektowanie pod kątem możliwej **adaptacji**
3. Projektowanie pod kątem **demontażu**
4. Stosowanie **zasad gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ)** (ograniczenie wytwarzania odpadów, ponowne wykorzystanie odpadów lub materiałów z rozbiórki, użycie recyklatów, renowacja, regeneracja, ponowne przetworzenie, dostosowanie do nowego zastosowania, odzysk itp.)
5. Stosowanie materiałów o **niskim śladzie węglowym** (takich jak materiały biologiczne) w celu zastąpienia tych o wysokim śladzie węglowym (takich jak beton) bez pogorszenia trwałości.
6. Zwiększenie **środowiskowej wydajności** łańcuchów produkcyjnych (efektywność energetyczna, włączenie energii odnawialnej, rozwój technologiczny itp.)
7. Wykorzystanie **lokalnych produktów**

Projektowanie pod kątem trwałości/długowieczności, możliwości adaptacji oraz demontażu są strategiami wdrażanymi na poziomie budynku. Jednakże strategie te znajdują również odzwierciedlenie na poziomie wyrobów budowlanych, biorąc pod uwagę mniejsze

zapotrzebowanie na produkcję nowych materiałów budowlanych i mniejszą ilość generowanych odpadów w czasie. Materiały wspierające te strategie przyczyniają się do redukcji śladu węglowego budynków.

Projektowanie z myślą o długowieczności ma na celu osiągnięcie ponadczasowej architektury, przy jednoczesnym wykorzystaniu trwałych materiałów i wyrobów, które można ponownie wykorzystać w przyszłości. Długowieczność pozwala zasobom wykorzystanym w budownictwie przetrwać długi czas (np. spowalniając cykl życiowy).

Projektowanie pod kątem możliwości adaptacji umożliwia budynkowi zmianę przeznaczenia bez większych ingerencji i wykorzystanie znacznie mniejszej ilości materiałów w porównaniu z generalną renowacją / remontem. Redukuje to potrzebę rozbiórki i eliminuje znaczną ilość odpadów z budowy i rozbiórki. Budynki zdolne do adaptacji mogą przechodzić zmiany przestrzenne i funkcjonalne w trakcie swojego życia, pozwalając na wielokrotne cykle życia. Zwiększoną adaptacyjność zapewnia zastosowanie koncepcji modułowych, łatwo zmienialnych fasad umożliwiających zmiany w wyglądzie i funkcjonalności budynku oraz instalacji technicznych typu "podłącz i działaj" (ang. *plug-and-play*).

Projektowanie z uwzględnieniem demontażu/rozbiórki ułatwia demontaż budynku po zakończeniu jego okresu użytkowania w taki sposób, że elementy i części systemu, które przetrwały swój okres użytkowania, mogą być poddane recyklingowi, ponownemu użyciu lub odzyskaniu w celu dalszego wykorzystania. Rozbiórkę budynków można ułatwić zmniejszając jego złożoność poprzez sprzyjanie modułowości i lekkości elementów, prefabrykację, uproszczenie połączeń między elementami konstrukcyjnymi a niekonstrukcyjnymi oraz minimalizację liczby i rodzaju komponentów czy wybór materiałów nadających się do ponownego użycia. Demontaż obejmuje także zabezpieczanie aktualnej konstrukcji, analizę zawartości budynku, dekontaminację i usuwanie wszelkich odpadów niebezpiecznych, prace rozbiórkowe oraz operacje recyklingu w celu odzyskania wartości istniejących materiałów. **Więcej informacji na temat strategii projektowania o obiegu zamkniętym można znaleźć w przewodnikach : "Strategie budynków o obiegu zamkniętym" oraz „Bezpieczne wykorzystanie wtórnych materiałów budowlanych. Pakiet informacyjny dla producentów”.**

Możliwość ponownego użycia i recyklingu materiałów budowlanych, wraz z ogólną zasadą obiegu zamkniętego i innymi zasadami gospodarki cyrkularnej, reprezentują podejścia mające na celu minimalizację śladu węglowego i innych wpływów na środowisko na etapie wycofania tych materiałów z eksploatacji. Efektywniejsze wykorzystanie zasobów jest istotnym aspektem redukcji emisji gazów cieplarnianych (GHG). Szacuje się, że do 2050 roku stosowanie łączenia cyrkularnych praktyk w budownictwie (takich jak konstrukcje modułowe, użycie lżejszych materiałów, ograniczone wykorzystanie stali czy recykling niewykorzystanego cementu) może zmniejszyć emisje GHG w UE nawet o 80 megaton rocznie.

### 3.1. Możliwe sposoby produkcji wyrobów o niskim śladzie węglowym

Istnieje kilka podejść i zaleceń dla producentów materiałów budowlanych mających na celu zmniejszenie śladu środowiskowego (szczególnie śladu węglowego) ich materiałów. Te podejścia opierają się głównie na zasadach gospodarki o obiegu zamkniętym. Potencjalne sposoby produkcji wyrobów budowlanych o niskim śladzie węglowym, opisane przez Orsiniego i Marrone (2019), to:

- stosowanie alternatywnych materiałów,
- stosowanie naturalnych materiałów,

- wprowadzanie surowców wtórnych,
- wdrażanie systemów wychwytywania i składowania dwutlenku węgla (CCS) oraz wychwytywania i wykorzystywania dwutlenku węgla (CCU) w procesie produkcji,
- zwiększanie wykorzystania energii z odnawialnych źródeł,
- zwiększanie wydajności produktu.

### 3.1.1. Użycie alternatywnych materiałów:

Typowym przykładem jest beton, którego wpływ na środowisko jest silnie powiązany z produkcją cementu portlandzkiego. Proces ten wiąże się z emisją ponad 1 tony CO<sub>2</sub> na tonę wyprodukowanego cementu. Jako zamiennik cementu można zastosować różne materiały alternatywne, umożliwiające produkcję betonu o stosunkowo niskim śladzie węglowym.

- popiół lotny (produkt uboczny spalania pyłu węglowego w elektrowniach termoelektrycznych),
- żużel granulowany (produkt uboczny procesu produkcji żeliwa, w trakcie którego powstaje duża ilość ciekłego żużla, niewiele różniącego się od cementu portlandzkiego),
- pył krzemionkowy (produkt uboczny procesów produkcji krzemu metalicznego i stopów krzemu-żelaza w piecach elektrycznych),
- odpad z czerwonej cegły itp.

#### Korzyści:

- redukcja śladu węglowego i innych wpływów na środowisko (co wymaga weryfikacji metodą LCA),

#### Przeszkody w stosowaniu alternatywnych materiałów przy produkcji betonu:

- ryzyko utraty wydajności
- ograniczony dostęp do niektórych alternatywnych materiałów
- brak wiedzy/chęci zmian w zakresie produkcji
- odmienny wygląd estetyczny.

### 3.1.2. Użycie wtórnych materiałów

Podejście to opiera się na ponownym wykorzystaniu materiałów używanych, pochodzących z recyklingu i materiałów odpadowych. Niektóre przykłady to:

- wykorzystywanie materiałów pochodzących z rozbiórki (odpady budowlane i rozbiórkowe - CDW). Użycie CDW może pomóc w redukcji śladu węglowego np. betonu,
- wykorzystywanie drewna konstrukcyjnego wycofanego z eksploatacji jako surowca do produkcji drewna klejonego krzyżowo,
- wykorzystanie materiałów odpadowych, takich jak popiół lotny i żużel wielkopiecowy w produkcji betonu może zredukować emisje gazów cieplarnianych,
- materiały z recyklingu lub odpadowe mogą być stosowane do produkcji cegieł, co również może prowadzić do redukcji emisji gazów cieplarnianych,
- nawierzchnie drogowe wykonane z różnych materiałów z recyklingu (nawierzchnia asfaltowa z odzysku, żużel stalowy itp.).

Istnieje kilka wyzwań związanych z wykorzystaniem z materiałów wtórnych:

1. Dostępność i jakość materiałów wtórnych stanowią wyzwanie w znalezieniu odpowiednich i stałych źródeł do recyklingu lub ponownego wykorzystania. Niewystarczające systemy zbierania i separacji mogą również ograniczać dostępność wysokiej jakości materiałów wtórnych.

2. Kluczowa jest odpowiednia infrastruktura do zbierania, sortowania i przetwarzania materiałów wtórnych. Wdrożenie wydajnych systemów zbierania oraz inwestowanie w nowoczesne sortownie może być kosztowne i wymagać współpracy pomiędzy różnymi zainteresowanymi stronami.
3. Ekonomiczne uzasadnienie stosowania materiałów wtórnych zależy od popytu na rynku, kosztów produkcji i cen. Jeśli koszty zbierania, sortowania i przetwarzania materiałów wtórnych przewyższają wartość uzyskanych produktów, promowanie ich stosowania może być bezproduktywne.
4. Skuteczne przepisy i polityki odgrywają istotną rolę w promowaniu wykorzystania materiałów wtórnych. Należy ustanowić jasne wytyczne, normy i mechanizmy egzekwowania, aby zapewnić jakość, bezpieczeństwo i zgodność materiałów wtórnych z istniejącymi procesami produkcyjnymi.
5. Zachęcanie konsumentów do korzystania z produktów wykonanych z materiałów wtórnych może stanowić wyzwanie. Świadomość, edukacja społeczna i promowanie korzyści wynikających ze stosowania surowców wtórnych są niezbędne do zmiany zachowań konsumentów.
6. Włączenie do produkcji większych ilości materiałów wtórnych może wymagać dostosowania lub modernizacji istniejącej infrastruktury i technologii. Podczas włączania materiałów wtórnych do procesów produkcyjnych mogą pojawić się problemy związane ze zgodnością i ograniczeniami technicznymi, co pociągnie za sobą konieczność inwestycji w badania i rozwój.
7. Zarządzanie złożonym łańcuchem dostaw, obejmującym wielu interesariuszy, takich jak zbieracze, przetwórcy, producenci i sprzedawcy detaliczni, może stanowić wyzwanie. Koordynacja działań, zapewnienie transparentności i utrzymanie kontroli jakości w całym łańcuchu dostaw są kluczowe dla skutecznej integracji materiałów wtórnych.
8. Kluczowe znaczenie ma przewyższenie uprzedzeń społecznych dotyczących stosowania materiałów wtórnych. Niektórym osobom materiały pochodzące z recyklingu lub ponownie użyte mogą nadal kojarzyć się z niższą jakością, co może utrudnić ich akceptację w różnych branżach i rynkach konsumenckich.

#### Korzyści:

- Korzystanie z odpadów budowlanych (CDW) w procesie produkcji prowadzi do oszczędności miejsca na składowiskach i zmniejszenia wpływów wynikających z budowy nowych budynków mieszkalnych. Użycie CDW może przyczynić się do redukcji śladu węglowego wyrobu budowlanego opartego na materiałach wtórnych.

#### Dodatkowe przeszkody:

- brak normalizacji / standaryzacji UE w zakresie handlu materiałami wtórnymi,
- przepisy dotyczące wykorzystania surowców wtórnych,
- ograniczenia odległości w zakresie dostarczania CDW,
- brak wiedzy w sektorze produkcji,
- odmienny wygląd estetyczny,
- brak akceptacji społecznej,
- brak wymaganej infrastruktury procesowej,
- niewystarczający łańcuch dostaw.

Stosowanie materiałów wtórnych może prowadzić do zmniejszenia wpływu na środowisko, w tym śladu węglowego. Jednakże, czynnikami mającymi największy wpływ, są jakość pierwotnego materiału rozbiórkowego oraz końcowego produktu budowlanego, określonego przez odpowiednie wymagania.

***Dodatkowe informacje na temat materiałów wtórnych i ich zastosowania w materiałach budowlanych można znaleźć w dokumencie “Bezpieczne stosowanie wtórnych materiałów budowlanych - Pakiet informacyjny dla producentów”.***

### 3.1.3. Wykorzystanie naturalnych (biopochodnych) materiałów:

Zazwyczaj materiałami pochodzenia biologicznego (biomateriałami), które mogą zastąpić materiały budowlane o wysokim poziomie wbudowanego śladu węglowego, takie jak beton i cegły, bez utraty trwałości, jest drewno konstrukcyjne.

Innym przykładem biomateriałów budowlanych jest ziemia zmieszana z naturalnymi spoiwami (wapno, popiół lotny) lub włóknami naturalnymi (drewno, konopie, wełna owcza, materiały pochodzące z sektora rolnego).

#### Korzyści:

- niski stopień przetwarzania i niski koszt produktów,
- bezpieczeństwo zdrowotne produktu,
- lokalna dostępność,
- potencjał do aktywizacji lokalnych innowacyjnych łańcuchów zdolnych do odzyskiwania aspektów tradycji budowlanej,
- sekwestracja biogenicznego węgla w naturalnych materiałach. Niektóre naturalne materiały absorbują większą ilość węgla w trakcie całego cyklu życia niż ilość węgla emitowana podczas produkcji samego produktu.

#### Przeszkody:

- konieczność kompensowania niskich wydajności poprzez zwiększanie grubości produktów budowlanych,
- brak wiedzy/chęci do zmian w sektorze produkcji,
- brak wykwalifikowanych pracowników.

### 3.1.4. Wykorzystanie lokalnych materiałów:

Emisje gazów cieplarnianych (GHG) można zredukować, minimalizując odległości transportu surowców do miejsca produkcji. Najbardziej preferowaną opcją jest wykorzystanie materiałów pochodzących z rozbiórek bezpośrednio na miejscu budowy.

#### Przeszkody:

- konieczność kompensowania niskich wydajności poprzez zwiększanie grubości elementów/produktów budowlanych,
- brak wiedzy/chęci do zmian w sektorze produkcji,
- ograniczenia odległości dotyczące zaopatrzenia (***więcej w przewodniku “Circular procurement guideline”***),
- przestrzeń niezbędną do tymczasowego składowania materiałów pochodzących z rozbiórki.

### 3.1.5. Zwiększenie wydajności

Zwiększenie wydajności związane jest z optymalizacją, na przykład poprzez:

- zużycie mniejszej ilości surowców,
- doskonalenie projektowania pod kątem redukcji emisji gazów cieplarnianych,
- rozwijanie nowych materiałów opartych na nanotechnologii, które mogą poprawić właściwości użytkowe tradycyjnych materiałów (drewno, beton).

#### Korzyści:

- redukcja emisji,
- oszczędzanie zasobów naturalnych.

#### Przeszkody:

- brak wiedzy/chęci zmian w sektorze produkcji,
- wysokie koszty badań i rozwoju.

### 3.1.6. Integracja energii odnawialnej

Energia jest wykorzystywana na wszystkich etapach cyklu życia materiałów budowlanych (produkcja, zastosowanie, utylizacja/recykling). Emisje gazów cieplarnianych (GHG) można zredukować poprzez wykorzystanie energii z paneli fotowoltaicznych (słonecznych), turbin wiatrowych, elektrowni wodnych i innych odnawialnych źródeł energii, a także poprzez wykorzystanie odpadów do produkcji energii (ciepła/elektryczności).

#### Korzyści:

- redukcja emisji gazów cieplarnianych

#### Przeszkody:

- wysokie koszty związane z wdrożeniem odnawialnych źródeł energii

### 3.1.7. Inne podejścia

Sposoby ograniczania emisji gazów cieplarnianych (GHG) wiążą się również z:

- odzyskiem ciepła z procesu produkcyjnego i jego ponownym wprowadzaniem do procesu produkcyjnego,
- rozwojem technologicznym lub innowacją procesu produkcyjnego,
- wzrostem wydajności procesu produkcyjnego,
- efektywnością energetyczną,
- symbiozą przemysłową,
- wprowadzeniem systemów takich jak wychwytywanie i sekwestracja węgla, wychwytywanie i wykorzystanie węgla (w tym biotechnologiczne) itd.

Oprócz tych podejść do produkcji wyrobów budowlanych o niskim śladzie węglowym, Gra-zieschi (2022) przedstawił przegląd pewnych inicjatyw związanych z cyrkularnością i materiałami o niskim śladzie węglowym w sektorze budownictwa. Strategie mające na celu redukcję śladu węglowego w budynkach to także:

- projekty zapewniające trwałość konstrukcji
- zastosowanie zasad gospodarki o obiegu zamkniętym (ograniczenie generowania odpadów, ponowne wykorzystanie materiałów z odpadów lub rozbiórki, użycie materiałów pochodzących z recyklingu),
- projektowanie umożliwiające demontaż i separację na miejscu rozbiórki

*Więcej informacji nt. strategii redukcji śladu węglowego budynków można znaleźć w przewodniku „Strategie budownictwa cyrkularnego”.*

Można także podkreślić inne aspekty, takie jak strategia obejmująca pięć filarów, mająca na celu maksymalizację efektywności obecnych technologii oraz postęp w badaniach i rozwoju nowych technologii przyjaznych dla środowiska. Pięć filarów, które powinny się wzajemnie uzupełniać, obejmuje:






- zwiększanie efektywności obecnych technologii,
- włączanie zrównoważonych ekologicznie pobocznych technologii do powszechnych praktyk,
- przyspieszanie integracji technologii hybrydowych do powszechnych zastosowań,
- opracowywanie zastosowań nano- i biotechnologii w budownictwie.







## 4. Przykładowa lista cyrkularnych i niskoemisyjnych wyrobów budowlanych

Przykłady cyrkularnych i niskoemisyjnych wyrobów budowlanych przedstawiono w Tabeli 2. Wyroby te uważa się za bardziej zrównoważone pod względem środowiskowym ze względu na ich właściwości cyrkularne tzn., możliwość ich ponownego użycia lub recyklingu oraz niższy ślad węglowy w porównaniu z tradycyjnymi materiałami budowlanymi. Poniżej przedstawiona lista jest fragmentem większego zbioru, a nie pełną i skończoną listę wyrobów budowlanych. Decyzja, które wyroby budowlane należy zastosować w określonych projektach budowlanych, zależy od studium przypadku i powinna być podejmowana indywidualnie.

Tabela 2: Lista wyrobów budowlanych, które uważa się za cyrkularne i mające względnie niski ślad węglowy.

Rysunek	Przeznaczenie	Uwagi
<b>Drewno konstrukcyjne (EWP)</b>		
<p><b>Płyty izolacyjne z włókna drzewnego (WFIB)</b></p> 	Zastosowanie jako materiał izolacyjny (dach, ściana, podłoga, sufit, wnętrze, elewacja, poddasze)	
<p><b>Produkty z drewna klejonego krzyżowo (CLT)</b></p> 	Alternatywa dla systemów żelbetowych (betonowa płyta stropowa) i konstrukcji stalowych	Klej może być problemem
<p><b>Fornir klejony warstwowo (LVL)</b></p> 	Zastosowanie w belkach, nadprożach, słupach (uwzględniając konstrukcje budowlane), nadprożach drzwi i okien, podłużnice schodów, płatwiach i dźwigarach dachowych	Klej może być problemem
<p><b>Drewno klejone warstwowo (Glulam)</b></p> 	Zastosowanie w elementach konstrukcyjnych, szkieletach budynków, słupach, belkach itp. Alternatywa dla konstrukcji stalowych i betonowych płyt stropowych.	Klej może być problemem
<p><b>Lite drewno konstrukcyjne</b></p> 	Zastosowanie w elementach konstrukcyjnych, szkieletach budynków, słupach, belkach itp. Alternatywa dla konstrukcji stalowych i betonowych płyt stropowych.	
<b>Cement zawierający surówce wtórne</b>		
<p><b>Cement zawierający kruszywo z recyklingu (C&amp;DW)</b></p>	Zastosowanie może być ograniczone, ponieważ zależy od wymagań jakościowych. Zastosowanie przy fundamentach budynków, budowie podbudów drogowych, podbudów i chodników, konstrukcyjnych elementach betonowych, budowie nasypów i ścian oporowych, produkcji prefabrykatów betonowych itp.	Beton z recyklingu pogarsza trwałość elementów, skracając ich żywotność.
<p><b>Cement zawierający żużel wielkopiecowy</b></p>	Zastosowanie w fundamentach, płytach i podjazdach, betonie masowym (tamy i fundamenty), produkcji prefabrykatów betonowych (bloki i panele), betonie wysokowartościowym.	Wymywanie związków.

Rysunek	Przeznaczenie	Uwagi
<b>Beton zawierający popioły lotne ze spalania węgla</b>	Zastosowanie w budowie chodników, budownictwie mieszkaniowym (fundamenty, płyty, podjazdy), prefabrykacjach betonowych (bloki, płyty, rury), budowie konstrukcji mostowych (belki, kolumny, pomosty), tamach, fundamentach itp.	Wymywanie związków.
<b>Cegły zawierające surowce wtórne i cegły z odzysku</b>		
<b>Cegły z błota</b>	 Zastosowanie w budownictwie niskim (budynki mieszkalne, małe obiekty), architekturze tradycyjnej i ludowej, murach i płotach granicznych, wiatkach magazynowych, budynkach rolniczych i innych niemieszkalnych konstrukcjach, zastosowań artystycznych i dekoracyjnych.	
<b>Cegły zawierające popioły lotne (FAB)</b>	 Budowa ścian, ścianek działowych i innych elementów konstrukcyjnych, budowa obiektów handlowych i przemysłowych (biura, magazyny), budowa mostów i przepustów, zastosowania nawierzchniowe (podjazdy, chodniki i inne powierzchnie zewnętrzne), zastosowanie do ścian wewnętrznych i działowych, zastosowanie w projektach renowacyjnych i modernizacyjnych itp.	Obawy związane z potencjalnym zanieczyszczeniem spowodowanym przez odpady i powolny rozwój przemysłu oraz stopień akceptacji społecznej mogą być przyczyną ograniczenia w stosowaniu.
<b>Cegły zawierające żużel</b>	 Zastosowanie do ścian, fasad i innych elementów konstrukcyjnych, budowy obiektów handlowych i przemysłowych (biura, magazyny, zakłady produkcyjne), mostów i przepustów, budowy ścian oporowych, zastosowań nawierzchniowych (podjazdy, chodniki i inne powierzchnie zewnętrzne), ścian ogrodowych i elementy dekoracyjne, ściany dźwiękochonne wzdłuż autostrad, zastosowanie do ścian wewnętrznych i działowych itp.	Obawy związane z potencjalnym zanieczyszczeniem spowodowanym przez odpady i powolny rozwój przemysłu oraz stopień akceptacji społecznej mogą być przyczyną ograniczenia w stosowaniu.
<b>Cegły zawierające węglan wapnia</b>	 Zastosowania nawierzchniowe (chodniki, elementy małej architektury), zastosowania w elementach dekoracyjnych w projektach architektonicznych, zastosowania w konstrukcjach o niskiej wytrzymałości lub nienośnych.	Obawy związane z potencjalnym zanieczyszczeniem spowodowanym przez odpady i powolny rozwój przemysłu i stopień akceptacji społecznej mogą być przyczyną ograniczenia w stosowaniu. Ograniczenia strukturalne.
<b>Cegły z recyklingu</b>	Zastosowanie do elewacji budynków, tworzenia ścieżek i chodników w ogrodach, parkach i krajobrazach mieszkalnych, budowy tarasów i dziedzińców, budowy lub renowacji kominów i kominów, wznoszenia ścian oporowych, podłóg wewnętrznych, zastosowania w różnych elementach architektonicznych (łuki, kolumny, elementy dekoracyjne elementy), obrzeża ogrodowe itp.	Zwykle nie nadaje się do zastosowań nośnych. W przypadku takich zastosowań należy spełnić wymagania wytrzymałościowe.

Rysunek	Przeznaczenie	Uwagi
<b>Stal</b>		
Stal	Różnorodne zastosowania: pręty zbrojeniowe, belki konstrukcyjne, rury, blachy, części samochodowe, kontenery, produkcja sprzętu AGD (lodówek, pralek i pieców), budowa i konserwacja torów kolejowych i mostów, produkcja mebli (krzesła, stoły i inne metalowe elementy mebli), zbrojenie konstrukcji betonowych itp.	Stal nie jest materiałem niskoemisyjnym ze względu na wysokoenergetyczne procesy wydobywania, hartowania, wzbogacania i walcowania. Jednakże stal można wielokrotnie poddawać recyklingowi w celu wytworzenia nowej stali. Z tego punktu widzenia jest to materiał cyrkularny.
<b>Geopolimery</b>		
Geopolimery	Stosowany jako spoiwo do zrównoważonych materiałów budowlanych (alternatywa dla wapna i zwykłego cementu portlandzkiego), do produkcji prefabrykatów betonowych (bloków, płyt i rur), przy budowie dróg do produkcji trwałego i wysokowytrzymałego betonu na chodniki i inne elementy konstrukcyjne, produkcja materiałów izolacyjnych, powłok ognioodpornych konstrukcji i materiałów, druk 3D elementów konstrukcyjnych, produkcja ceramiki, elementów architektonicznych (panele dekoracyjne, rzeźby, elewacje budynków).	
<b>Pozostałe wyroby budowlane</b>		
Szkło	Okna i drzwi, artykuły gospodarstwa domowego, meble, panele szklarniowe itp.	
Ziemia ubijana w szalunkach (ściany)	Stosowane w budownictwie małogabarytowym (domy mieszkalne), ogrodzeniach i murach ogrodzeniowych, renowacji obiektów zabytkowych, stodołach, budynkach magazynowych, ekranach akustycznych wzdłuż autostrad.	
Płyty gipsowo-kartonowe	Stosowane w budownictwie o małej skali (domy mieszkalne), ogrodzeniach i ścianach granicznych, renowacji budynków historycznych, stodoły, budynki magazynowe, ekrany akustyczne wzdłuż autostrad. Zastosowanie do wewnętrznych ścianek działowych, sufitów podwieszanych i podwieszanych, ognioodpornych zestawów ściennych, paneli akustycznych, redukujące przenoszenie dźwięku, łuki, wnęki, elementy dekoracyjne itp.	
Beton konopny	Izolacja ścian i dachów, wznoszenie nienośnych ścian wewnętrznych, w niektórych przypadkach zewnętrznych ścian nienośnych, renowacje i renowacje obiektów zabytkowych, budowa małych domów itp.	
Nawierzchnia asfaltowa	Zastosowanie w budownictwie drogowym (mieszanki asfaltowe, budowa podbudowy i podbudowy, odnawianie nawierzchni i renowacji dróg).	Nie ma zastosowania do budowy budynków, ale w innych obiektach budowlanych
Ziemia z wykopu	Zastosowanie przy zasypywaniu wyrobisk, niwelowaniu krajobrazu, ogrodach, rekultywacji terenów zdegradowanych, budowie lub renowacji boisk sportowych, jako materiał na nasypy w projektach budowy dróg, w niektórych przypadkach jako substytut kruszywa budowlanego w niektórych zastosowaniach, materiał wierzchni przy operacjach na składowiskach.	Zastosowanie wydobytej gleby powinno być zgodne z lokalnymi przepisami i wytycznymi, aby zapewnić zgodność z wymogami ochrony środowiska i zapobiec zanieczyszczeniu.

## 4.1. Drewno konstrukcyjne

Drewno masowe (klejone) może być stosowane jako zrównoważona alternatywa dla stali i betonu w budownictwie. Płyty z drewna masowego stosowane są jako elementy konstrukcyjne budynków jak również jako podłogi i ściany nośne.

Jednym z rodzajów drewna masowego jest drewno klejone krzyżowo (CLT). To jednym z najpopularniejszych produktów z drewna konstrukcyjnego stosowanych w budownictwie. Do jego produkcji wykorzystuje się drewno iglaste oraz kleje poliuretanowe. Technologia laminowania klejowego pozwala na produkcję elementów konstrukcyjnych z drewna o dowolnie dużych rozmiarach. Dzięki temu wyroby z drewna, takie jak drewno klejone (glulam) i drewno klejone krzyżowo (CLT), stały się konkurentami stali i żelbetu na rynku konstrukcyjnym średnich i wysokich budynków wielokondygnacyjnych. Możliwe zastosowania różnych wyrobów z drewna konstrukcyjnego przedstawiono w Tabeli 2.

Biorąc pod uwagę dane literaturowe, zaobserwowano, że opcja niemieszkalnego średnio-kondygnacyjnego budynku z drewna, z wykorzystaniem elementów CLT i drewna klejonego, charakteryzuje się wyższą energią pierwotną w porównaniu z jego odpowiednikiem żelbetowym. Tę rozbieżność przypisuje się znacznemu wykorzystaniu energochłonnych elementów CLT w opcji budownictwa drewnianego. Jednakże opcja z ciężkim drewnem skutkowałaby niższym współczynnikiem GWP niż opcja z żelbetem, ponieważ podczas produkcji elementów CLT dominowało zużycie energii ze źródeł odnawialnych, wraz z wyższą energią surowca zawartego w panelach CLT.

Odpady drzewne z rozbiórki są najczęściej przetwarzane na wióry i wykorzystywane do produkcji energii (np. produkcji ciepła i energii elektrycznej w drodze spalania) lub do produkcji płyt wiórowych. Nadal praktykowane jest składowanie odpadów drzewnych. Jednakże, z uwagi na podejście oparte na gospodarce o obiegu zamkniętym, należy zwrócić uwagę na możliwość ponownego wykorzystania i/lub recyklingu produktów z drewna konstrukcyjnego. Działania te są zależne od możliwości ich oddzielenia na etapie rozbiórki, co warto rozważyć już na etapie projektowania.

Innym czynnikiem mającym znaczący wpływ na zrównoważony charakter wyrobów z drewna konstrukcyjnego jest stosowanie podczas ich produkcji substancji impregnujących i klejów, które uwalniają lotne związki organiczne (LZO) i formaldehyd. Z uwagi na szkodliwość tych związków, opracowywane są wyroby z drewna konstrukcyjnego niezawierające kleju.

*Szczegółowy opis substancji niebezpiecznych, które mogą uwalniać się z wyrobów budowlanych w budynkach mieszkalnych, użyteczności publicznej oraz obiektach przemysłowych można znaleźć w przewodniku „Bezpieczne stosowanie wtórnych materiałów budowlanych. Pakiet informacyjny dla producentów”.*

## 4.2. Beton

Beton jest najbardziej rozpowszechnionym materiałem wytworzonym przez człowieka i drugim po wodzie najczęściej zużywanym zasobem na Ziemi. W większości krajów europejskich masa betonu stanowi ponad połowę masy materiałów zastosowanych w budynkach, a na przykład w Holandii 77 %. Powodem tak częstego zastosowania betonu jest jego plastyczność, trwałość i wysoka odporność na ścislenie oraz ogień. Tradycyjny beton jest materiałem budowlanym mającym znaczący wpływ na potencjał globalnego ocieplenia (co jest bezpośrednio związane ze śladem węglowym), czego powodem jest zastosowanie cementu, który jest najczęściej stosowanym spoiwem w betonie. Przemysł cementowy odpowiada za około 8 % światowej emisji CO<sub>2</sub>. Produkcja cementu jest również bardzo energochłonna i wymaga znacznych ilości wody (Graaf i Schuitemaker, 2022).

Wśród możliwych alternatyw zmniejszenia śladu środowiskowego (węglowego) konwencjonalnego betonu znajduje się synergiczne połączenie sektora odpadów i sektora betonu. Najbardziej obiecujące surowce do produkcji „zielonych betonów” można pozyskać z odpadów budowlanych i rozbiórkowych (odpady z budowy i rozbiórki). Odpady z budowy i rozbiórki to jeden z największych strumieni odpadów stałych, ponieważ w Unii Europejskiej powstaje ponad 450 milionów ton tych odpadów rocznie (Ortiz i in., 2010), z czego 40–67 % składa się z betonu. Recykling wycofanego z eksploatacji betonu (uzyskanego z miejsc rozbiórki) na użyteczne materiały, takie jak kruszywo z recyklingu, jest ważnym sposobem znacznego zmniejszenia ilości odpadów z budowy i rozbiórki. Innymi obiecującymi surowcami do produkcji „świeżego betonu” są różnego rodzaju odpady przemysłowe, zarówno w roli kruszywa, jak i spoiwa. Biorąc pod uwagę zrównoważone zarządzanie tymi materiałami, materiały wtórne z jednej branży mogłyby w idealnym przypadku służyć jako zasób dla innej branży. Warunkiem ich stosowania jako substytutu materiałów naturalnych jest jednak ich akceptowalność środowiskowa i adekwatność techniczna.

Wszystkie alternatywne materiały należy ocenić pod kątem korzyści dla środowiska i kompromisów, wpływających na ocenę cyklu życia (LCA). Kilku autorów badało wpływ kruszyw pochodzących z recyklingu na środowisko w porównaniu z kruszywami naturalnymi, a także wpływ betonów opartych na materiałach pochodzących z recyklingu/alternatywnych w porównaniu z betonami konwencjonalnymi, biorąc pod uwagę wyniki analizy LCA. Na przykładzie pracy Blengini i Garbarino (2010) którzy badali, w jaki sposób kruszywa pochodzące z recyklingu mogą w zrównoważonym strumieniu uzupełniać kruszywa naturalne dla branży budowlanej. Wykazali oni, że recykling odpadów z budowy i rozbiórki może być ekologiczny.

W innym badaniu Knoeri i in. (2013) przeanalizowali wpływ cyklu życia 12 alternatywnych mieszanek betonowych i porównali je z odpowiadającymi im betonami konwencjonalnymi. Badane mieszanki betonowe różniły się zawartością kruszywa pochodzącego z recyklingu, rodzajem cementu i zawartością cementu. Stwierdzono, że betony oparte na materiałach pochodzących z recyklingu/alternatywnych mogą zmniejszyć wpływ na środowisko do około 70 % w porównaniu z betonami konwencjonalnymi. Wiązało się to głównie z korzyściami uzyskanymi z odzyskanego złomu (ze zbrojenia stalowego), a także z uniknięciem konieczności transportu odpadów z budowy i rozbiórki na składowisko oraz skutków unieszkodliwiania.

Zastąpienie w procesie produkcji betonu, kruszyw naturalnych na kruszywa ma pochodzące z recyklingu nie powoduje zauważalnej redukcji śladu węglowego. Potwierdzili to Faleschini i in. (2014), którzy porównali produkcję betonu zawierającego kruszywo żużłowe EAF C z produkcją odpowiedniego betonu konwencjonalnego. Żużel EAF C był stosowany jako zamiennik gruboziarnistego kruszywa naturalnego w różnych mieszankach betonowych. Ocena LCA wykazała, że emisje związane z produkcją kruszywa sztucznego z żużla EAF C są znacznie niższe niż te związane z wydobyciem kruszywa naturalnego. Jednakże zawartość cementu była nieco wyższa w scenariuszu alternatywnym. Ponieważ cement jest głównym czynnikiem odpowiedzialnym za emisję przy produkcji betonu, analizowane betony alternatywne i konwencjonalne wykazały dość porównywalny wpływ. Wyniki są jednak wrażliwe na rodzaj stosowanego transportu oraz odległości dostaw kruszyw naturalnych i pochodzących z recyklingu.

Wiele badań dotyczy oceny śladu węglowego typowych mieszanek betonowych (np. patrz Flower i Sanjanyan, 2007, Marceau i in., 2007; Zhang i in., 2014) . Niektóre składniki cemen-

towe, takie jak popiół lotny i mielony granulowany żużel wielkopiecowy (oba produkty są przemysłowymi produktami ubocznymi) wykazują potencjał redukcji emisji w przemyśle produkcji betonu (więcej szczegółów można znaleźć w badaniach Flower i Sanjanyan, 2007 oraz O'Brien i in., 2009). Stwierdzono, że popiół lotny jest w stanie zmniejszyć emisję gazów cieplarnianych z betonu o około 15 %, a żużel wielkopiecowy o około 22 % w typowych mieszankach betonowych.

Biorąc pod uwagę rozbiórkę konstrukcji betonowej, odpadowy beton można poddać recyklingowi jako materiał budowlany (np. zazwyczaj pokruszyć w celu wytworzenia kruszywa pochodzącego z recyklingu), jeśli spełnia klasę jakości określoną w rozporządzeniu w sprawie recyklingu materiałów budowlanych. Do materiałów odzyskiwanych zaliczają się m.in. gruz betonowy i żelbetowy, prefabrykowane elementy betonowe (np. kolumny, elementy stropowe) oraz fundamenty betonowe. Możliwe zastosowania to: materiał wypełniający, materiał zasypowy, podwarstwy do budowy dróg, podkonstrukcje stropów budynków w budownictwie, kruszywa betonowe, warstwy drenażowe itp. (patrz Tabela 2). Nadal praktykowane jest składowanie (około 11 % odpadowego betonu trafia na składowiska w krajach UE), zwłaszcza gdy frakcja betonowa jest zanieczyszczona innymi materiałami. Ponadto, gruz betonowy uważa się za nienadający się do odzyskania, jeśli nie spełnia wymagań dla danego zastosowania. Dotyczy to w szczególności gruzu betonowego z terenów przemysłowych zanieczyszczonego szkodliwymi substancjami (np. powłokami smołowymi).

W przypadku selektywnej rozbiórki konstrukcji betonowych, odpadowy beton niezanieczyszczony może być wykorzystany do produkcji kruszywa pochodzącego z recyklingu do betonu. Projektowanie obiektów modułowych lub z prefabrykatów z uwagi na ich demontaż umożliwia ponowne wykorzystanie elementów betonowych. Prefabrykowane belki słupowe można wykorzystać ponownie. Odpowiedni rodzaj złącza umożliwia ponowne wykorzystanie betonowych systemów stropowych i prefabrykowanych fasad betonowych.

### 4.3. Cegła

Cegły są jednym z najczęściej stosowanych materiałów budowlanych. Są używane od ponad siedmiu tysięcy lat. Na ocenę cyklu życia tradycyjnej cegły glinianej ma wpływ: zastosowanie surowców pierwotnych, wytworzenie wysokich temperatur, a co za tym idzie dużych ilości emitujących energię gazów cieplarnianych, potencjalnie odpowiedzialnych za globalne ocieplenie.

Aby poprawić parametry środowiskowe cegieł, produkuje się cegły alternatywne poprzez dodanie odpadów przemysłowych (patrz Tabela 2). Biorąc pod uwagę cykl życia cegieł alternatywnych, różnice w porównaniu z ceglami tradycyjnymi dotyczą: (i) wydobycia surowca, (ii) wykorzystania materiałów odpadowych, które całkowicie lub częściowo zastępują glinę oraz (iii) etapu produkcji – wypalanie często eliminowane i zastępowane procesami stabilizacyjnymi, ograniczających energię gazów cieplarnianych, potencjalnie odpowiedzialnych za globalne ocieplenie.

Aby zoptymalizować korzystne wykorzystanie odpadów i materiałów wtórnych, do produkcji cegieł można stosować popiół lotny, muł z pogłębiania, żużel i osad węglanu wapnia (Tabela 2). Na przykład cegły popiołowo-piaskowe mają kilka zalet: dostępność w różnych klasach nośności, oszczędność w tynkowaniu zaprawą i walory estetyczne. Nie nakładają dodatkowego obciążenia na konstrukcję, wykazują zwiększoną odporność na trzęsienia ziemi dzięki zastosowaniu paneli z cegieł o wysokiej wytrzymałości, zapewniają zadowalającą izolację akustyczną, zapewniają maksymalne odbicie światła bez olśnienia oraz wykazują doskonałą odporność ogniową i trwałość (Ferrer Polancos, 2009).

Biorąc pod uwagę koniec życia cegieł, można zalecić następujące ścieżki ich recyklingu: (i) recykling na materiał do budowy dróg i zasypywania wyrobisk, (ii) recykling w celu zastąpienia cementu w tynkach, (iii) recykling na materiał (kruszywo) do produkcji betonu oraz (iv) aktywację alkaliczną. Co więcej, cegły wycofane z eksploatacji można poddać recyklingowi na drobne kruszywo i wykorzystać jako gliniane nawierzchnie sportowe. Recykling cegieł na materiał do budowy dróg i zasypywania wyrobisk wydaje się być najpowszechniejszą praktyką. W tego rodzaju zastosowaniach cegły są kruszone razem z innymi materiałami obojętnymi i wykorzystywane do produkcji kruszywa pochodzącego z recyklingu.

Biorąc pod uwagę projekt rozbiórki, główną strategią jest budowanie konstrukcji bezzaprawowych, w których cegły są połączone za pomocą stalowych płyt i kotew ściennych. Prefabrykacja jednostek modułowych dodatkowo zwiększa potencjał ponownego wykorzystania cegieł.

#### 4.4. Stal

Stal jest materiałem szeroko stosowanym w budownictwie ze względu na swoją trwałość, elastyczność, odporność na naprężenia oraz dużą gęstość, która pozwala na realizację stosunkowo lekkich konstrukcji. Stosowana jest w prawie wszystkich elementach konstrukcyjnych. Około 50% światowego zapotrzebowania na stal związane jest z budową infrastruktury i budynków. Produkcja stali, obok cementu, jest głównym czynnikiem przyczyniającym się do emisji gazów cieplarnianych, które mogą mieć wpływ na globalne ocieplenie. Biorąc pod uwagę informacje World Steel Association z roku 2023, przy produkcji jednej tony stali powstaje 1,9 tony dwutlenku węgla, co odpowiada około 8% światowej emisji CO<sub>2</sub>. Jednakże stal jest materiałem w 100% nadającym się do recyklingu i po ponownym użyciu zachowuje prawie wszystkie swoje pierwotne właściwości. Stal można wielokrotnie poddawać recyklingowi w celu wytworzenia nowej stali. Problem związany z recyklingiem stali wiąże się ze stosunkowo dużym zużyciem energii. Niemniej jednak stal pochodzącą z recyklingu, stosowaną w nowych budynkach, można uznać za materiał niskoemisyjny.

W przypadku rozbiórki budynku lub innych konstrukcji stal jest zwykle zbierana w celu recyklingu. Recykling stali jest typową praktyką gospodarowania odpadami. W przypadku selektywnej rozbiórki niektóre elementy stalowe, takie jak płatywie, belki i kolumny, można ponownie wykorzystać. Ponowne wykorzystanie po zakończeniu okresu eksploatacji zazwyczaj obejmuje piaskowanie elementu stalowego w celu usunięcia farby i ponowne malowanie (dodanie nowej farby i powłoki cynkowej oraz jako warstwy ochronnej).

#### 4.5. Geopolimery

„Geopolimer” odnosi się do amorficznego krzemoglinianu metalu alkalicznego, charakteryzującego się powtarzalną jednostką monomeru (-Si-O-Al-O-). Uważany za cement trzeciej generacji, geopolimer stanowi alternatywę dla wapna i zwykłego cementu portlandzkiego. Beton geopolimerowy można wytwarzać poprzez polimeryzację glinokrzemianów, takich jak popiół lotny, metakaolin, żużel, popiół z łusek ryżowych i popiół drzewny o wysokiej zawartości wapnia, poprzez aktywację roztworem alkalicznym. Stąd wydajność produkcji betonu geopolimerowego jest w dużym stopniu uzależniona od aktywatorów, a także rodzaju zasobów glinokrzemianów. Proces produkcji betonu geopolimerowego zazwyczaj eliminuje potrzebę stosowania OPC, który jest najczęściej używanym cementem w mieszance betonowej. Geopolimery wykazują obiecujący potencjał jako spoiwa dla zrównoważonych materiałów budowlanych, oferując wczesną wytrzymałość na ściskanie, niską przepuszczalność, doskonałą odporność chemiczną i niezwykle właściwości ogniodoporne (patrz

Singh i in., 2015) . Jest uważany za materiał niskoemisyjny, ponieważ proces produkcji wymaga mniej energii w porównaniu do cementu. Stwierdzono, że zastosowanie betonu geopolimero- wego jako alternatywy dla konwencjonalnego betonu z cementu portlandzkiego powoduje aż do 80 % redukcję zawartego węgla, w zależności od użytego prekursora i aktywatora.

#### 4.6. Asfalt z recyklingu

Regenerowany asfalt jest materiałem o niskiej zawartości węgla pochodzącym z recyklingu, stosowanym w budowie dróg. Składa się z asfaltu i kruszyw odzyskanych z istniejących nawierzchni asfaltowych, które zostały usunięte często podczas konserwacji lub przebudowy dróg.

Nawierzchnia asfaltowa z recyklingu (RAP) jest cennym źródłem kruszywa i bitumu. Włączenie RAP do produkcji asfaltu nie tylko wydłuża żywotność obecnych zasobów naturalnych, ale także zmniejsza zależność od paliw kopalnych w produkcji asfaltu.

Recykling asfaltu, można go ogólnie podzielić na „na gorąco” i „na zimno, a także metody „na miejscu” i „w zakładzie”. W procesie recyklingu na gorąco RAP jest mieszany na miejscu z nowymi materiałami z wytwórni asfaltu, a następnie poddawany jest standardowym procedurom układania i walcowania. Podejście to jest szczególnie skuteczne w przypadku szybkiego rozwiązywania problemów z warstwą ścieralną. W przypadku recyklingu „w zakładzie” RAP jest transportowany na plac centralny zakładu, gdzie jest składowany i ponownie przetwarzany. Następnie RAP traktowany jest jako surowiec do produkcji mieszanek na gorąco. Znaczące oszczędności w recyklingu poza zakładem wynikają przede wszystkim z materiałów objętych RAP, takich jak bitum, kruszywo i wypełniacz mineralny. Produkcja tych materiałów wiąże się z emisją gazów cieplarnianych i innych emisji. Oszczędności materiałów pierwotnych związane z recyklingiem RAP mogą skutkować redukcją gazów cieplarnianych i innych emisji.

Recykling na zimno na miejscu wykorzystuje technikę „spienionego bitumu” do renowacji zniszczonych nawierzchni asfaltowych. Metoda ta polega na odzyskiwaniu materiałów z drogi za pomocą maszyny recyklingowej, generującej nową warstwę nawierzchni i rewitalizującej istniejącą konstrukcję nawierzchni. Warto zauważyć, że technika ta różni się od innych metod recyklingu asfaltu tym, że eliminuje potrzebę podgrzewania kruszywa, zmniejszając w ten sposób zużycie energii, a w konsekwencji ograniczając emisję – w tym gazów cieplarnianych.

Poniżej przedstawiono niektóre przykłady z literatury pokazujące redukcję gazów cieplarnianych dzięki recyklingowi RAP. Giustozzi i in. (2012) zbadali ślad węglowy związany z przebudową nawierzchni lotniska. Porównano dwa scenariusze: renowację istniejącej nawierzchni poprzez (1) użycie wyłącznie kruszywa i bitumu pierwotnego oraz (2) wykorzystanie 85 % materiałów pochodzących z recyklingu. W tym drugim przypadku emisję gazów cieplarnianych zmniejszono o 35 %. Zużycie energii i emisje gazów cieplarnianych odpowiadające różnym typom prac związanych z renowacją i konserwacją nawierzchni drogowych były również badane przez Chappat i Bilal (2003), Chehovits i Galehouse (2010), Cross i Chesner (2011) itp.

Podsumowując, zastosowanie RAP w budowie dróg oferuje szereg korzyści środowiskowych i ekonomicznych:

- ochrona zasobów: włączenie RAP do nowych mieszanek asfaltowych pozwala zachować zasoby naturalne poprzez ponowne wykorzystanie materiałów ze starych chodników,
- oszczędność energii: produkcja asfaltu z RAP zazwyczaj wymaga mniej energii w porównaniu do produkcji asfaltu pierwotnego z surowców. Przyczynia się to do zmniejszenia ogólnej emisji gazów cieplarnianych,



- obniżenie kosztów: stosowanie RAP może być opłacalne, ponieważ zmniejsza zapotrzebowanie na nowe surowce i minimalizuje koszty usuwania odpadów związanych ze starą nawierzchnią asfaltową,
- większy zrównoważony rozwój: poprzez ponowne wykorzystanie istniejących materiałów, RAP promuje zrównoważony rozwój w budowie dróg, dostosowując się do praktyk świadomych ekologicznie.

Warto zauważyć, że konkretny wpływ na środowisko i zrównoważony rozwój projektów budowy dróg zależy od różnych czynników, w tym od procentu użytego RAP, ogólnego projektu mieszanki i wymaganych odległości transportowych. Niemniej jednak wykorzystanie odzyskanego asfaltu jest ogólnie uważane za pozytywny krok w kierunku bardziej zrównoważonych i niskoemisyjnych praktyk budowy dróg o obiegu zamkniętym.

#### 4.7. Ziemia z wykopów

Wydobyta gleba to materiał powstały w wyniku wykopania lub usunięcia gleby i innych materiałów naturalnych, nawet po przeniesieniu.

Gleba z wykopów musi zostać poddana ocenie przez uprawnionego specjalistę lub instytucję, zanim zostanie uznana za nadającą się do jakiegokolwiek celu. W zależności od klasy jakości określonej w Federalnym Planie Gospodarki Odpadami, urobek gruntowy może być wykorzystany do różnych zastosowań, w tym jako warstwa rekultywacyjna, warstwa rekultywacyjna do celów nierolniczych oraz wypełnienie podłoża, zarówno w wodzie gruntowej, jak i bezpośrednio nad nią, na obszarach z podobnymi sytuacjami skażenia oraz jako materiał do recyklingu do zastosowań niezwiązanych i związanych. Więcej szczegółów na temat aplikacji można znaleźć w Tabeli 2.

#### 4.8. Inne niskoemisyjne wyroby budowlane

Inne powszechnie stosowane stosunkowo niskoemisyjne materiały budowlane to **szkło, płyty gipsowo-kartonowe** i różnego rodzaju **materiały izolacyjne**.

**Ściana z ubijanej ziemi w szalunkach** i **beton konopny** to niskoemisyjne materiały budowlane, które nie są tak powszechnie stosowane jak tradycyjne materiały budowlane. Jednak w coraz większym stopniu docenia się ich korzyści pod względem zrównoważonego rozwoju. W miarę wzrostu świadomości kwestii środowiskowych i potrzeby stosowania bardziej ekologicznych praktyk budowlanych, te alternatywne materiały zyskują popularność wśród architektów, budowniczych i właścicieli domów poszukujących „bardziej ekologicznych” rozwiązań budowlanych.

Ziemia ubijana w szalunkach to zagęszczany naturalny surowiec taki jak: ziemia, kreda, wapno lub żwir, w solidne ściany. Ta technika konstrukcyjna znana jest ze swojej masy termicznej i właściwości izolacyjnych, które przyczyniają się do efektywności energetycznej budynków.

Beton konopny to materiał kompozytowy wykonany z włókien konopi zmieszanych z wapnem i wodą. Jest ceniony ze względu na niski wpływ na środowisko, potencjał pochłaniania dwutlenku węgla i właściwości izolacyjne.

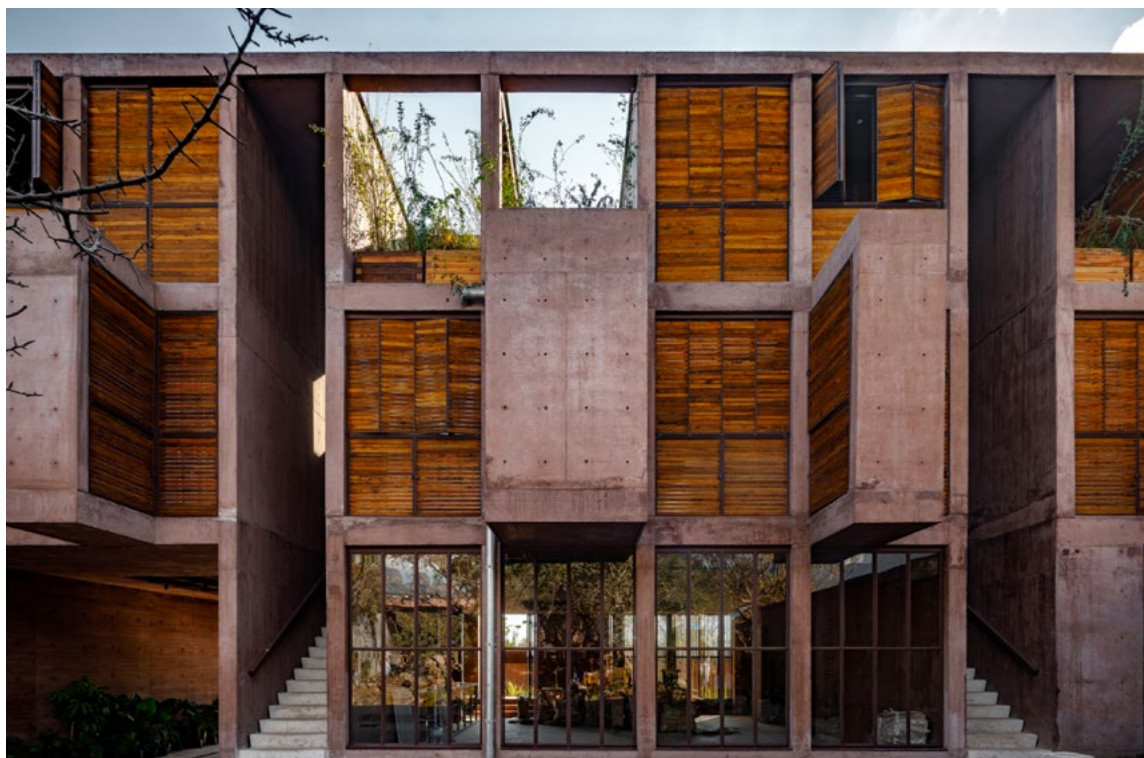
*Dodatkowe informacje na temat praktyk recyklingu i ponownego użycia różnych materiałów budowlanych z uwzględnieniem ich etapu wycofania z eksploatacji można znaleźć w dokumencie „Bezpieczne użytkowanie wtórnych materiałów budowlanych. Pakiet informacyjny dla producentów”. W niniejszym dokumencie przedstawiono studia przypadków dotyczące materiałów budowlanych po rozbiórce.*

## 4.9. Studium przypadków: konstrukcje oparte na materiałach cyrkularnych i niskoemisyjnych

### Hotel Tepoztlán (Meksyk, 2020):

- ściany i chodnik: kamień lokalny,
- widoczny beton z naturalnymi pigmentami,
- drewniane szalunki używane do budowy hotelu zostały ponownie wykorzystane do produkcji mebli lub podłóg.

Rysunek 2: Hotel Tepoztlán [źródło: <https://architizer.com/projects/tepoztlan-hotel/>]



### Rezydencja, Obserwatorium Cheopsa / Pracownia Malka Architektura, Giza (Egipt, 2020):

- lokalne techniki budowlane,
- użyte materiały pochodzące z recyklingu.

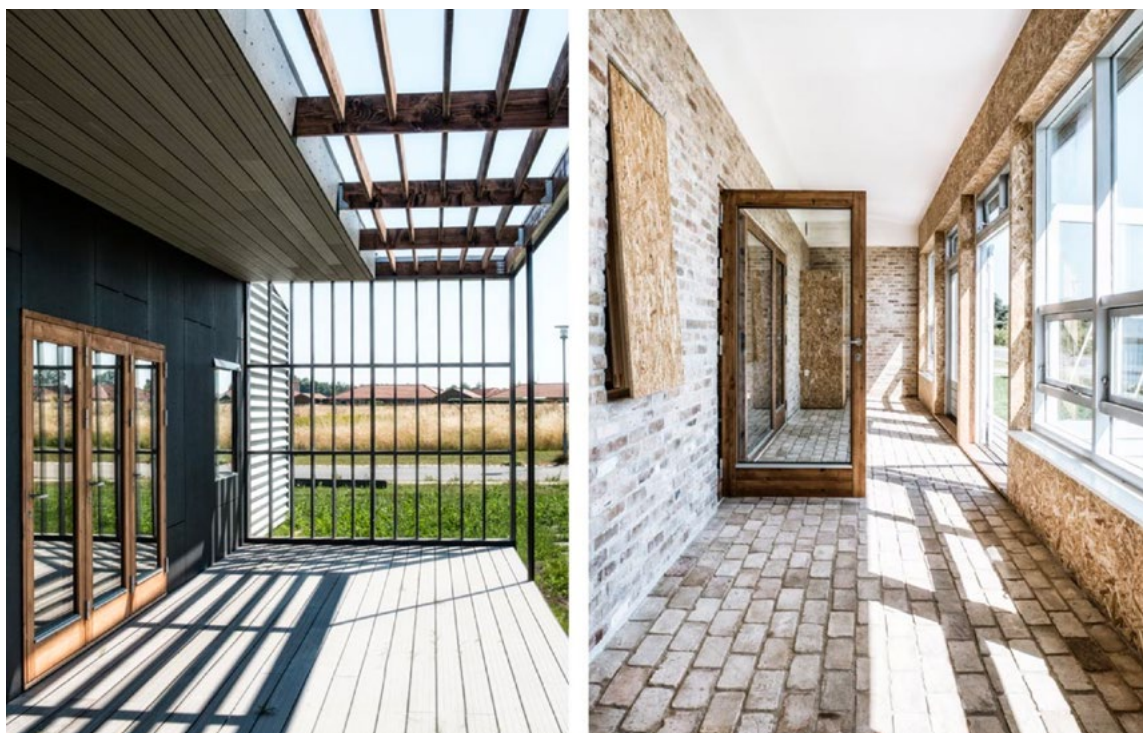
Rysunek 3: Rezydencja, Obserwatorium Cheopsa [źródło: <https://www.designboom.com/architecture/studio-malka-cheops-observatory-pyramid-giza-03-05-2020/>]



**Upcycle House (dom wykonany z materiałów z recyklingu), Lendager Architekti, Nyborg (Dania, 2013):**

- dom zbudowany z naciskiem na recykling i przetwarzanie materiałów,
- zużyto materiały odpadowe,
- materiały z recyklingu przetworzono na materiały budowlane o wyższej wartości.

Rysunek 4: Upcycle House [źródło: <https://www.archdaily.com/458245/upcycle-house-lendager-arkitekter>]



## 5. Ocena cyklu życia

Uwzględniając efektywność środowiskową poszczególnych materiałów/komponentów budowlanych, można ocenić ogólny ślad środowiskowy budynku. Wpływ na środowisko wiąże się z:

- projektem i konstrukcją budynku (zastosowane materiały i elementy),
- zużyciem energii i wody w fazie eksploatacji budynku,
- potencjałem ujawniającym się po zakończeniu użytkowania budynku (przydatność materiałów i elementów do ponownego wykorzystania itp.).

Ocena cyklu życia (LCA) to metoda oceny efektywności środowiskowej produktu lub procesu. Metodę tę można zatem zastosować do oceny potencjału globalnego ocieplenia (np. śladu węglowego) i zestawienia innych wpływów na środowisko w całym cyklu życia budynku, infrastruktury lub określonego materiału budowlanego.

Ocenę LCA należy przeprowadzić zgodnie z zasadami i ramami LCA, które są określone w międzynarodowej normie ISO 14040: 2006 i ISO 14044: 2006, podręczniku ILCD oraz europejskiej normie dotyczącej deklaracji środowiskowych produktu (EPD) EN 15804:2012 + A2:2019, które zawierają zasady dotyczące podstawowych kategorii produktów (PCR) dla deklaracji środowiskowych typu III dla wszelkich wyrobów budowlanych i usług budowlanych. Proces normalizacji odbywa się zgodnie z normą ISO 14025: 2010. *Dodatkowe informacje na temat znormalizowanych (normatywnych) typów oznakowań środowiskowych i deklaracji środowiskowych (w tym EPD) można znaleźć w wytycznych „Bezpieczne stosowanie wtórnych materiałów budowlanych. Pakiet informacyjny dla producentów” oraz „Strategie projektowania budynków o obiegu zamkniętym”.*

W badaniu LCA można wyróżnić cztery fazy:

1. Określenie celu i zakresu, podczas której ustala się kontekst analizy poprzez zdefiniowanie jednostki funkcjonalnej/deklarowanej, granic systemu oraz wszelkich założeń i ograniczeń analizy.
2. Faza inwentaryzacji przepływów do i z badanego systemu, takich jak wejścia surowców, wody i energii oraz wyjścia pozostałości i emisji do powietrza, gleby i wody.
3. Faza oceny oddziaływania na środowisko w oparciu o wyniki inwentaryzacji.
4. Faza interpretacji, podczas której wnioski z analizy inwentaryzacji i/lub oceny wpływu są podsumowywane i oceniane w odniesieniu do określonego celu i zakresu badania.

Granice systemu LCA produktów mogą być różne, w zależności od celu i zakresu analizy. Można wyróżnić dwa podstawowe zakresy analizy LCA :

**Od kołyski do bramy:** odnoszący się do etapu produkcji, który obejmuje wydobycie surowców, dostarczenie ich do fabryki (miejsca produkcji) wraz z wytworzeniem produktu końcowego.

**Od kołyski do grobu:** podczas, którego oprócz etapu produkcji uwzględnione są wszystkie pozostałe etapy cyklu życia: faza instalacji, faza użytkowania i faza końca życia (wycofanie z eksploatacji, usunięcie, przetwarzanie czy unieszkodliwianie odpadów).

W przypadku LCA stosowanego w ekoprojektowaniu istotne może być uwzględnienie recyklingu analizowanych materiałów/wyrobów, poszerzając w ten sposób granice systemu (podejście „od kołyski do kołyski”).

Tabela 3: Etapy całego cyklu życia uwzględniające podejście modułowe

GRANICE SYSTEMU																
Faza wyrobu			Faza procesu budowy		Faza użytkowania							Faza końca życia			Korzyści i obciążenia poza granicami systemu	
Dostawa surowców	Transport	Wytwarzanie	Transport	Proces budowlano-montażowy	Użytkowanie	Konserwacja	Naprawa	Wymiana	Renowacja	Operacyjne zużycie energii	Operacyjne zużycie wody	Dekonstrukcja - wyburzenie	Transport	Przetwarzanie odpadów	Wywóz	Potencjał ponownego użycia, odzysku, recyklingu
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D

Granice systemu mają budowę modułową zgodną z normą EN 15804 (Tabela 3). Opis etapów i modułów cyklu życia jest następujący:

- Faza wyrobu:**
- A1:** wydobywanie i przetwarzanie surowców, przetwarzanie surowców wtórnych (np. procesy recyklingu);
  - A2:** transport do producenta;
  - A3:** wytwarzanie/produkcja;
- obejmujące dostarczenie wszelkich materiałów, wyrobów i energii, a także przetwarzanie odpadów aż do stanu uzyskania statusu odpadu lub usunięcia finalnej pozostałości z fazy wyrobu.
- Faza procesu budowy:**
- A4:** transport na miejsce montażu/budowy;
  - A5:** proces budowlano-montażowy;
- obejmujące dostarczenie wszelkich materiałów, wyrobów i energii, a także przetwarzanie odpadów aż do stanu uzyskania statusu odpadu lub utylizację pozostałości z procesu budowlanego. Te moduły obejmują również wszystkie oddziaływania i aspekty związane ze wszystkimi stratami na etapie procesu budowlanego (tj. produkcja, transport i przetwarzanie odpadów oraz utylizacją utraconych wyrobów i materiałów).
- Faza użytkowania:**
- B1:** use or application of the installed product;
  - B2:** konserwacja;
  - B3:** naprawa;
  - B4:** wymiana;
  - B5:** renowacja;
  - B6:** operacyjne zużycie energii (np. systemy grzewcze i inne instalacje związane z budynkiem);
  - B7:** operacyjne zużycie wody
- faza obejmuje również dostarczenie i transport wszystkich materiałów, wyrobów i związanych z tym zużyciem energii i wody, jak również przetwarzaniem odpadów, aż do stanu utraty statusu odpadu lub usunięcia pozostałości. Moduły zawierają także oddziaływania związane ze stratami podczas tej części fazy użytkowania (produkcja, transport, przetwarzanie odpadów oraz usunięcie utraczonych wyrobów i materiałów).
- Faza końca życia:**
- C1:** dekonstrukcja, wyburzenie;
  - C2:** transport do miejsca przetwarzania wyrobów;
  - C3:** przetwarzanie odpadów w celu ponownego użycia, odzysku czy recyklingu;
  - C4:** wywóz;
- łącznie z zaopatrzeniem i transportem, zapewnieniem niezbędnych w tym celu materiałów, produktów i powiązanych z tym zużyciem energii i wody.
- Korzyści i obciążenia poza granicami systemu:**
- D:** Potencjał ponownego użycia, odzysku oraz recyklingu, wyrażone jako korzyści i obciążenia netto.

Istnieje wiele korzyści dla środowiska wynikających z ponownego użycia w porównaniu z recyklingiem. Ponowne wykorzystanie może wyeliminować wpływ związany zarówno z wydobyciem surowców, jak i wytwarzaniem produktów. Natomiast recykling pozwala na oszczędności w zakresie wydobycia surowców. Zatem oszczędności, jakie można uzyskać w wyniku ponownego użycia w stosunku do recyklingu, mogą być znaczne. Główną zaletą materiału ponownie użytego w porównaniu z nowym materiałem nadającym się do ponownego użycia jest to, że pozwala on natychmiastowo ograniczyć wpływ na środowisko, zamiast zapewniać hipotetyczne oszczędności w przyszłości.

Korzyści wynikające z ponownego użycia ujęte są w module C (etap wycofania z eksploatacji), który obejmuje transport, zapewnienie wszystkich materiałów i produktów niezbędnych do tego procesu oraz powiązane z tym zużycie energii i wody. Należy zamodelować przetwarzanie odpadów i uwzględnić w inwentaryzacji podstawowe przepływy.

Granica systemu wycofania z eksploatacji systemu wyrobu budowlanego do modułu D wyznaczana jest w przypadku, gdy produkty wyjściowe, tj. materiały wtórne lub paliwa, osiągnęły stan „end-of-waste” zgodnie z normą EN 15804:2013 + A2:2017. Obciążenia (np. emisje) powstałe w wyniku usuwania odpadów w module C4 są uważane za część badanego systemu. Jeżeli jednak w procesie tym powstaje energia, np. ciepło i energia, ze spalania odpadów lub składowania, potencjalne korzyści z wykorzystania tej energii w następnym systemie produktowym przypisane są do modułu D. Zatem moduł D pokazuje, że korzyści środowiskowe wynikające z ponownego użycia w następnym cyklu życia (tj. nietworzenie nowych produktów) będzie większe niż korzyści wynikające z recyklingu (tj. nie wytwarzanie produktów pierwotnych).

## 6. Podsumowanie i wnioski

Sektor budowlany odpowiada za około jedną trzecią wszystkich światowych emisji gazów cieplarnianych. Ponieważ nowe konstrukcje charakteryzują się zmniejszonym operacyjnym zużyciem energii, coraz większą uwagę należy zwracać na elementy wbudowane, takie jak wbudowany ślad węglowy i potencjał globalnego ocieplenia (GWP), z uwagi na wyroby budowlane. Sektor budowlany powinien skoncentrować się na optymalizacji wpływu wyrobów na środowisko wynikającym z procesów ich produkcji (w tym wydobycia, zużycia energii i zużycia wody), a także praktyk mających na celu ich wycofanie z eksploatacji (w tym utylizacją odpadów, ponownym wykorzystaniem, ponownym wykorzystaniem, recyklingiem itp.).

W niniejszych wytycznych zebrano wskazówki i zalecenia mające na celu zmniejszenie śladu środowiskowego (zwłaszcza śladu węglowego) wyrobów budowlanych. Wskazówki zawarte w przewodniku w dużym stopniu opierają się na integracji surowców z: materiałami pochodzenia biologicznego, materiałami zawierającymi materiały pochodzące z recyklingu, korzystnym wykorzystaniu materiałów odpadowych (wtórnych) oraz na zasadach gospodarki o obiegu zamkniętym, np. poprzez dłuższe użytkowanie obiektów/wyrobów i maksymalizację odzyskiwania wyrobów pod koniec cyklu życia (upcykling).

W niniejszych wytycznych przedstawiono przykładową listę cyrkularnych i niskoemisyjnych wyrobów budowlanych. Każdy wyrób budowlany z listy jest opisany z uwagi na jego zastosowanie, cyrkularność (postępowanie z odpadem na etapie końca życia) i wpływ na środowisko. Lista ta stanowi jednak jedynie przykład, a nie pełną i ustaloną listę wyrobów budowlanych. Zawiera wskazówki dla decydentów i innych interesariuszy w jaki sposób uczynić sektor budowlany zrównoważonym środowiskowo i zgodnym z zasadami gospodarki o obiegu zamkniętym. Jednakże decyzja, które wyroby budowlane zastosować w określonych projektach budowlanych, zależy od studium przypadku i jako taka nie może być uogólniona.

Ponadto, przedstawiona w niniejszej pracy metoda ocena cyklu życia jest najbardziej obiecującym narzędziem do oceny śladu węglowego i ogólnego wpływu wyrobów (wyrobów budowlanych) i konstrukcji (budynków) na środowisko.

## 7. Bibliografia

Ahn, N., Dodoo, A., Riggio, M., Muszynski, L., Schimleck, L., Puettmann, M., 2022: Circular economy in mass timber construction: State-of-the-art, gaps and pressing research needs. *Journal of Building Engineering* 53, 104562.

Amran, Y.H.M., Alyousef, R., Alabduljabbar, H., El-Zeadani, M., 2020. Clean production and properties of geopolymers concrete; A review. *J. Clean. Prod.* 251, 119679. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119679>

Andabaka, A., 2023: Circular Construction Principles: From Theoretical Perspective to Practical Application in Public Procurement.

Asdrubali F., Baggio, P., Prada, A., Grazieschi, G., 2019: Dynamic life cycle assessment modeling of a NZEB building. *Energy* 191, 116489. DOI:10.1016/j.energy.2019.116489

Asdrubali, F., Grazieschi, G., 2020: Life cycle assessment of energy efficient buildings. *Energy Reports* 6, 270-285. DOI:10.1016/j.egyr.2020.11.144

Blengini, G.A., Garbarino, E., 2010. Resources and waste management in Turin (Italy): the role of recycled aggregates in the sustainable supply mix. *J. Cleaner Prod.* 18, 1021-1030. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.01.027>.

Bostanci S.C., Limbachiya, M., Kew, H., 2018: Use of Recycled Aggregates for Low Carbon and Cost Effective Concrete Construction. *Journal of Cleaner Production* 189, DOI:10.1016/j.jclepro.2018.04.090

Calkins, M., 2009: *Materials for Sustainable Sites: A Complete Guide to the Evaluation, Selection, and Use of Sustainable Construction Materials*; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA.

Carpenter, A.C., Gardner, K.H., 2009. Use of industrial by-products in urban roadway infrastructure. *Argument for increased industrial ecology. J. Ind. Ecol.* 13 (6), 965-977. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1530-9290.2009.00175.x>.

Chappat, M., Bilal, J., 2003. *The environmental road of the future: Life cycle analysis, energy consumption & greenhouse gas emissions*. Colas group.

<http://www.colas.com/FRONT/COLAS/upload/com/pdf/route-future-english.pdf>

Chehovits, J., Galehouse, L., 2010. Energy Usage and Greenhouse Gas Emissions of Pavement Preservation Processes for Asphalt Concrete Pavements. *First International Conference on Pavement Preservation*, Newport Beach CA, USA, 13 to 15 April 2010.

[https://www.pavementpreservation.org/icpp/paper/65\\_2010.pdf](https://www.pavementpreservation.org/icpp/paper/65_2010.pdf)

Cheung, 2003. *Use of Recycled Asphalt Pavement — A Practical Approach to Asphalt Recycling*.

cityloops.eu, 2023: *Circular construction in Europe: handbook for local and regional governments* [https://cityloops.eu/fileadmin/user\\_upload/Resources/City-Loops-Circular-Construction-handbook.pdf](https://cityloops.eu/fileadmin/user_upload/Resources/City-Loops-Circular-Construction-handbook.pdf)

Cross, S.A., Chesner, W.H., 2011. Life cycle environmental analysis for the evaluation of pavement rehabilitation options. *90th Annual meeting of the Transportation Research Board*, January 23-27, 2001, Washington, D.C.



D'Amico, B., Pomponi, F., Hartet, J., 2021: Global potential for material substitution in building construction: The case of cross laminated timber. *Journal of Cleaner Production* 279, 123487.

D'Amico, B., Pomponi, F., Hart, J., 2021: Global potential for material substitution in building construction: the case of cross laminated timber. *Journal of Cleaner Production*, 279, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123487>

De Schepper, M., Van den Heede, P., Van Driessche, I., De Belie, N., 2014. Life cycle assessment of completely recyclable concrete. *Materials* 7, 6010–6027. <http://dx.doi.org/10.3390/ma7086010>.

de Graaf, D., Schuitemaker, S., 2022: Circular Buildings: constructing a sustainable future Materials in buildings

Dumée, L.F. Circular Materials and Circular Design—Review on Challenges Towards Sustainable Manufacturing and Recycling. *Circ.Econ.Sust.* 2, 9–23 (2022). <https://doi.org/10.1007/s43615-021-00085-2>

Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J.L., Lukey, G.C., Palomo, A., van Deventer, J.S.J., 2007. Geopolymer technology: the current state of the art. *J. Mater. Sci.* 42, 2917–2933. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z>

Ellen MacArthur Foundation, 2013: SUN, and McKinsey Center for Business and Environment; Drawing from Braungart & McDonough, Cradle to Cradle (C2C)

Faleschini, F., De Marzi, P., Pellegrino, D., 2014. Recycled concrete containing EAF slag: environmental assessment through LCA. *Euro. J. Environ. Civil Eng.* 18 (9),1009–1024. <http://dx.doi.org/10.1080/19648189.2014.922505>.

Ferrer Polancos, C.J., 2009: ANNEXURE 4 ECO-FRIENDLY BUILDING MATERIALS AND TECHNOLOGIES Eco-housing Assessment Criteria -Version II. *ECO Housing - Building a better tomorrow*. Accessible on [https://www.academia.edu/10992817/ANNEXURE\\_4\\_ECO\\_FRIENDLY\\_BUILDING\\_MATERIALS\\_AND\\_TECHNOLOGIES\\_Eco\\_housing\\_Assessment\\_Criteria\\_Version\\_II](https://www.academia.edu/10992817/ANNEXURE_4_ECO_FRIENDLY_BUILDING_MATERIALS_AND_TECHNOLOGIES_Eco_housing_Assessment_Criteria_Version_II)

Flower, D.J.M., Sanjayan, J.G., 2007. Green house gas emissions due to concrete manufacture. *Int. J. Life Cycle Assess.* 12 (5), 282–288.

Fort, J., Černý, R., 2020: Transition to circular economy in the construction industry: Environmental aspects of waste brick recycling scenarios. *Waste Management* 118 (2020) 510–520

Giustozzi, F., Toraldo, E., Crispino, M., 2012. Recycled airport pavements for achieving environmental sustainability, an Italian case study. *Resources, Conservation and Recycling* 68, 67-75. doi:10.1016/j.resconrec.2012.08.013

Grazieschi, G., 2022: Circularity and Low-Carbon Building Materials in Construction (Overview Article). <https://build-up.ec.europa.eu/en/resources-and-tools/articles/overview-article-circularity-and-low-carbon-building-materials> Accessed 6th October 2023.

Gruhle, K., Schiller, G., 2023: Grey energy impact of building material recycling – a new assessment method based on process chains. *Resources, Conservation & Recycling Advances* 18, 200139.

- Heijungs, R., Guinée, J.B., 2007. Allocation and “what-if” scenarios in life cycle assessment of waste management systems. *Waste Manage.* 27, 997–1005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2007.02.013>.
- Hu, M., Kleijn, R., Bozhilova-Kisheva, K.P., Di Maio, F., 2013. An approach to LCSA: the case of concrete recycling. *Int. J. Life Cycle Assess.* 18, 1793–1803. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-013-0599-8>.
- Huang, Y., Bird, R.N., Heidrich, O., 2007. A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements. *Resour., Conserv. Recycl.* 52, 58–73. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.02.002>.
- Joensuu, T., Leino, R., Heinonen, J., Saari, a., 2022: Developing building s Life Cycle Assessment in Circular Economy-Comparing methods for assessing carbon footprint of reusable components. *Sustainable Cities and Society* 77, 103499.
- Knoeri, C., Sanye-Mengual, E., Althaus, H.J., 2013. Comparative LCA of recycled and conventional concrete for structural applications. *Int. J. Life Cycle Assess.* 18, 909–918. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-012-0544-2>.
- Llana, D.F., Gonzalez-Alegre, V., Portela, M., Iniguez-Gonzalez, G., 2022: Cross Laminated Timber (CLT) manufactured with European oak recovered from demolition: Structural properties and non-destructive evaluation. *Construction and Building Materials* 339 (2022) 127635
- Magwood, C., 2019: Opportunities for carbon dioxide removal and storage in building materials. Doctoral thesis, Sustainability Studies M.A. Graduate Program, Trent university, Peterborough, Ontario, Canada.
- Marceau, M.L., Nisbet, M.A., VanGeem, M.G., 2007. Life Cycle Inventory of Portland Cement Concrete. PCA R&D Serial No. 3007, Portland Cement Association 2007.
- Marinković, S., Radonjanin, V., Malešev, M., Ignjatović, I., 2010. Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. *Waste Manage.* 30, 2255–2264. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2010.04.012>.
- Mladenovič, A., Turk, J., Kovač, J., Mauko, A., Cotič, Z., 2014. Environmental evaluation of two scenarios for the selection of materials for asphalt wearing courses. *J. Cleaner Prod.* 87, 683–691. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.013>.
- Mroueh, U.M., Wahlström, M., 2002. By-products and recycled materials in earth construction in Finland – an assessment of applicability. *Resour., Conserv. Recycl.* 35, 117–129.
- Nußholz, J.L.K., Rasmussen, F.N., Whalena, K., Plepysa, A., 2019: A circular business model for material reuse in buildings: implications on value creation. *Journal of Cleaner Production* 245.
- O’Brien, K.R., Ménaché, J., O’Moore, L.M., 2009. Impact of fly ash content and fly ash transportation distance on embodied greenhouse gas emissions and water consumption in concrete. *Int. J. Life Cycle Assess.* 14, 621–629. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-009-0105-5>.
- Orsini and Marrone, 2019: Approaches for a low-carbon production of building materials: A review. *Journal of Cleaner Production* 241 (2019) 118380.
- Ortiz, O., Pasqualino, J.C., Castells, F., 2010. Environmental performance of construction waste: comparing three scenarios from a case study in Catalonia, Spain. *Waste Manage.* 30, 646–654. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2009.11.013>.

Pastori, S., Mazzucchelli, E., Wallhagen, M., 2022: Hybrid timber-based structures: A state of the art review. *Construction and Building Materials*. 359. 129505. 10.1016/j.conbuildmat.2022.129505.

Pavlů, T., Pešta, J., Volf, M., Lupišek, A., 2018: Katalog výrobků a materiálů s obsahem druhotných surovin. <http://www.recyklujmestavby.cz/wp-content/uploads/2019/10/Recyklujme-stavby-katalog-3.08.pdf>

Potrč Obrecht, T., Kunič, R., Jordan, S., Legat, A., 2019. Roles of the reference service life (RSL) of buildings and the RSL of building components in the environmental impacts of buildings. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 323 <https://doi.org/10.1088/1755-1315/323/1/012146>.

Ramos Huarachia, D.A., Gonçalves, G., de Francisco, A.C., Giovanetti Canteria, M.H., Piekarska, C.M., 2020: Life cycle assessment of traditional and alternative bricks: A review. *Environmental Impact Assessment Review* 80 (2020) 106335

Robertson, A.B., Lam, F.C.F., Cole, R.J., 2012: A Comparative Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Mid-Rise Office Building Construction Alternatives: Laminated Timber or Reinforced Concrete. *Buildings* 2(4), 245–70.

Rosado, L., Kalmykova, Y., Patrício, Y., 2017: Reprint of: Urban metabolism profiles. An empirical analysis of the material flow characteristics of three metropolitan areas in Sweden. *Journal of Cleaner Production* 163, 254-266.

Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M., Bhattacharyya, S.K., 2015. Geopolymer concrete: A review of some recent developments. *Constr. Build. Mater.* 85, 78–90. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.036>

Stahel, W.R., MacArthur, E., 2019: *The Circular Economy: A User's Guide*. DOI:10.4324/9780429259203

Tee, K.F., Mostofizadeh, S., 2021. A Mini Review on Properties of Portland Cement Concrete with Geopolymer Materials as Partial or Entire Replacement. *Infrastructures* 6, 26. <https://doi.org/10.3390/infrastructures6020026>

Thenoux, G., Gonzalez, A., Dowling, R., 2007. Energy consumption comparison for different asphalt pavements rehabilitation techniques used in Chile. *Resour. Conserv. Recycl.* 49, 325e339. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.02.005>.

Tonini, D., Caro, D., Cristobal, J., Foster, G., Pristera, G., 2023: Techno-economic and environmental assessment of construction and demolition waste management. With a view to support the feasibility assessment of preparation for re-use and recycling targets for individual material fractions. *JRC Science for policy report*.

Van den Heede, P., De Belie, N., 2012. Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and “green” concretes: literature review and theoretical calculations. *Cem. Concr. Compos.* 34, 431–442. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.01.004>.

Van Wyk, J., Mapiravana, J., Ampofo-Anti, N.L., 2012: Sustainable Materials in Building and Architecture. In: Letcher, T.M., Scott, J.L. (eds.), *Materials for a Sustainable Future* (Chapter 25). doi: <https://doi.org/10.1039/BK9781849734073-00668>

Varesa, S., Hradila, P., Sansomb, M., Ungureanuc, V., 2019: Economic potential and environmental impacts of reused steel structures, *Structure and Infrastructure Engineering*, DOI: 10.1080/15732479.2019.1662064.

Vilches, A., Garcia-martinez, A., Sanchez-Monta, B., 2017: Life cycle assessment (LCA) of building refurbishment. Lit. Rev. 135, 286–301. <https://doi.org/10.1016/j>.

Weil, M., Jeske, U., Schebek, L., 2006. Close-loop recycling of construction and demolition waste in Germany in view of stricter environmental threshold values. Waste Manage. Res. 24, 197–206. <http://dx.doi.org/10.1177/0734242X06063686>.

World Green Building Council, 2022: Annual Report. [https://worldgbc.org/wp-content/uploads/2022/12/WorldGBC-Annual-Report-2022\\_FINAL-version\\_LR.pdf](https://worldgbc.org/wp-content/uploads/2022/12/WorldGBC-Annual-Report-2022_FINAL-version_LR.pdf)

World steel Association. (2023) Sustainability Indicators 2023 report, <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Sustainability-indicators-report-2023.pdf>

Wouterszoon Jansen, B., van Stijn, A., Malabi Eberhardt, L.C., van Bortela, G., Gruis, V., 2022: The technical or biological loop? Economic and environmental performance of circular building components.

Zhang, J., Cheng, J.C.P., Lo, I.M.C., 2014. Life cycle carbon footprint measurement of Portland cement and ready mix concrete for a city with local scarcity of resources like Hong Kong. Int. J. Life Cycle Assess. 19, 745–757. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-013-0689-7>.

## Lista rysunków

Figure 1: The butterfly diagram of circular economy. Source: Ellen MacArthur Foundation (2013)

Figure 2: Hotel Tepoztlán [source: <https://architizer.com/projects/tepoztlan-hotel/>]

Figure 3: Cheops Observatory Residence [source: <https://www.designboom.com/architecture/studio-malka-cheops-observatory-pyramid-giza-03-05-2020/> ]

Figure 4: Upcycle House, Lendager Arkitekter, Nyborg [source: <https://www.archdaily.com/458245/upcycle-house-lendager-arkitekter>]

## Lista tabel

Tabela 1: Wbudowany ślad węglowy w różne materiały budowlane (źródło: Calkins, 2009).

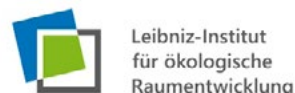
Tabela 2: Lista wyrobów budowlanych, które uważa się za cyrkularne i mają względnie niski ślad węglowy.

Tabela 3: Etapy całego cyklu życia uwzględniające podejście modułowe.

# CirCon4Climate



Członkowie konsorcjum:



Supported by:



on the basis of a decision  
by the German Bundestag

<https://www.euki.de/en/>

Opinie przedstawione w niniejszej publikacji są wyłączną odpowiedzialnością autora (autorów) i niekoniecznie odzwierciedlają poglądy Federalnego Ministerstwa Gospodarki i Działań na rzecz Klimatu (BMWK).

