

Iceland Liechtenstein Norway grants

Projekt „Wyspy wiedzy” korzysta z dofinansowania o wartości 155 956,00 EUR otrzymanego od Islandii, Liechtensteinu i Norwegii w ramach Funduszy EOG. Celem projektu jest rozwój kultury jakości w sektorze edukacji poprzez zdiagnozowanie, zaplanowanie, rozwinięcie i wdrożenie do 30.04.2024 r. koncepcji kształcenia uniwersyteckiego opartego na projektowaniu uniwersalnym, edukacji włączającej i spersonalizowanej, a także na kształceniu umiejętności kluczowych z punktu widzenia potrzeb społeczno-gospodarczych oraz kompetencji niezbędnych do swobodnego dostosowywania się studentów i absolwentów Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach do zmieniających się czasów.

Analiza cyklu życia ekstensywnego dachu zielonego – studium przypadku

Zuzanna Bedlińska¹, Magdalena Biela², Edyta Sierka^{2,3}

Uniwersytet Śląski w Katowicach,

¹Wydział Prawa i Administracji, ²Wydział Nauk Przyrodniczych, ³Kolegium Indywidualnych

Studiów Międzyobszarowych Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach

Abstrakt

W artykule zaprezentowano wykorzystanie ekologicznej oceny cyklu życia (LCA) do oceny wpływu na środowisko. W pierwszej części artykułu przedstawiono budowę i funkcję zielonych dachów oraz zdefiniowano narzędzie środowiskowej oceny cyklu życia (LCA) i jej składowe w oparciu o dane literaturowe. Następnie przeprowadzono wstępną analizę LCA w pierwszych trzech etapach cyklu życia i właściwą analizę LCA w tych samych etapach. LCA dla



Iceland Liechtenstein Norway grants

dachu eksperymentalnego wzbogacono o obliczenia wielkości śladu węglowego poszczególnych procesów. Na podstawie uzyskanych wyników wskazano zakres oddziaływania na środowisko jednostki funkcjonalnej dachu eksperymentalnego - 4 m² i obliczono jej ślad węglowy. Stwierdzono, że procesy produkcyjne komponentów zielonego dachu mają negatywny wpływ na elementy środowiska. Dostrzeżono również potrzebę kontynuacji badań w wypracowaniu mniej szkodliwej dla środowiska struktury ekstensywnego dachu zielonego.

Słowa kluczowe: dach zielony, ślad węglowy, ekologiczna ocena cyklu życia, LCA, wpływ na środowisko, zarządzanie środowiskowe

Wprowadzenie

Nieustająco rosnąca, na całym świecie, urbanizacja (Bai i in., 2020; Güneralp, 2014), wywiera presję na istniejącą zieloną infrastrukturę (ZI) w miastach i w sposób znaczący wpływa na jakość życia mieszkańców (Bagade i in., 2019). Efekt wyspy ciepła (UHI) w miastach, powstający w wyniku wzrostu temperatury terenów zabudowanych i utwardzonych (Pierzchała i Sierka, 2022), prowadzi do zmniejszenia przestrzeni roślinności i ewapotranspiracji oraz zwiększonej antropogenicznej produkcji ciepła (Frumkin i in., 2010). W tych okolicznościach rozwój zielonej infrastruktury i przywracanie miejskim przestrzeniom nowych funkcji lub odbudowywanie tych istniejących w celu ich ochrony przed zniszczeniem, w wielu miastach, głównie krajów Europy (European Commission, 2015), stały się działaniami priorytetowymi. Zielona infrastruktura bowiem stanowi naturalny system podtrzymywania życia środowiska regionalnego i jest podstawą bezpieczeństwa ekologicznego dla



Iceland Liechtenstein Norway grants

zrównoważonego rozwoju środowiska miejskiego. Ponadto zielona infrastruktura poprawia funkcjonowanie środowisk zabudowanych, zapewniając ludziom możliwość zbliżenia się do natury, poprawienia estetyki krajobrazu, promowania równości społecznej itd. (Coutts i Hahn, 2015), co jest powszechnie znane jako świadczenia ekosystemów (Costanza i in., 1997) dla poprawy jakości życia mieszkańców (Çağlak i in., 2021).

Jedną ze składowych ZI w obszarach miejskich są dachy zielone, których znaczenie dla środowiska i człowieka, dostrzeżono już w czasach starożytnych (Weber-Siwirska, 2013). Ponieważ powierzchnie dachowe budynków zajmują ok. 20–25% obszarów miejskich, mogą być skutecznie wykorzystywane do realizacji celów prowadzących m.in. do obniżenia temperatury powietrza na obszarach miast, przy wykorzystaniu roślinności. Dlatego zielone dachy, definiowane są jako poziome systemy życia, które pomagają złagodzić narastające problemy środowiskowe (Arabi i in., 2015) współczesnego świata.

Używając terminów „zielony dach, dach żywy, dach ekologiczny, dach porośnięty roślinnością czy ogród na dachu” (Francis i Lorimer, 2011), generalnie ma się na uwadze dwa główne typy dachów zielonych, tj. dach ekstensywny i dach intensywny. Oba typy dachów znane są od czasów prehistorycznych i stosowane w różny sposób aż do XIX wieku w wielu obszarach Europy (Abass i in., 2020). Dachy zielone były wówczas szeroko rozpowszechnione na różnych typach budynków, począwszy od kościołów, tymczasowych schronisk po domy mieszkalne. Nawet, gdy ludzie rozpoczęli działalność rolniczą w latach 3900-3600 p.n.e. i zaczęli budować wsie, koncepcja zielonej roślinności pozostała na chatach i budynkach (Osmundson, 1999) z powodu braku dostępnej alternatywy materiałowej jak i termoizolacji.



Iceland Liechtenstein Norway grants

Idea zielonych dachów w miastach, mająca na celu korzyści dla środowiska, intensywnie rozwijała się pod koniec XX wieku, biorąc początek w Niemczech (Köhler i Poll, 2010).

Ludzie, stając się bardziej świadomymi narastających wyzwań w dobie intensywnej urbanizacji i zachodzących zmian globalnych, zaczęli dostrzegać korzyści z poziomych systemów zielonych w trzech obszarach: środowiskowym, społecznym i ekonomicznym. Dziś dachy zielone na budynkach, w niektórych miastach świata, traktowane są jako elementy zagospodarowania przestrzennego środowiska miejskiego (Dz. U. z 2023 r. poz. 977), a coraz częściej jako materiały izolacyjne, które pomagają zmniejszyć m.in. zużycie energii i zwiększyć zatrzymywanie ciepła i wody opadowej (Bass i in., 2007) w skali lokalnej.

Zielone dachy są też przykładem ekologicznych systemów budowlanych opartych o założenia Nature-based Solution (NBS), które są wdrażane w nowych lub istniejących budynkach (Collier i in., 2021), gdzie w różnym stopniu pełnią funkcje i zapewniają usługi ekosystemowe (Calheiros i in., 2021) w miastach.

Rosnące zainteresowanie rozwojem dachów zielonych w ekosystemach miast niesie za sobą, jak każda działalność człowieka, oddziaływanie na elementy środowiska przyrodniczego np. poprzez pozyskanie materiałów niezbędnych do ich budowy (Aghamohammadi i in., 2022). Dlatego zaistniała konieczność oceny aspektów środowiskowych powstawania i funkcjonowania zielonych dachów (Brachet i in., 2019) w ciągu ich całego cyklu życia (LCA, life cycle assessment, life cycle analysis) (ISO 14040, 2006), co przełożyło się na znaczący wzrost liczby prowadzonych badań w zakresie LCA w obszarze zielonej infrastruktury (Campiotti i in., 2016).



Iceland Liechtenstein Norway grants

Co więcej, większy nacisk został położony na adaptację materiałów przyjaznych dla środowiska, co ma służyć wzmocnieniu zrównoważonego rozwoju, a także łagodzeniu skutków zmian klimatycznych na całym świecie. Zielone budownictwo ma na celu rozwój przyjaznych dla środowiska praktyk budowlanych, które przyczyniają się do oszczędzania energii, redukcji emisji, ponownego użycia i recyklingu materiałów (Spence i Mulligan, 1995).

Poza tym, LCA wykorzystuje się do oceny porównawczej różnych typów dachów np. ekstensywnych i intensywnych. Ostatnio w szeregu badań, systematycznie analizowano LCA poszczególnych warstw i materiałów, z jakich są zbudowane dachy zielone, w celu wyboru tych (Matějka i in., 2017), mających jak najmniejszy wpływ na elementy środowiska, wyrażany np. śladem węglowym (Androutopoulos i in., 2019). Oczekuje się, że pomoże to w określeniu optymalnego i zrównoważonego projektu dachu zielonego w przyszłości (Ateeq i in., 2020) w odniesieniu do materiałów wykorzystywanych do jego budowy.

Poszukując przyjaznych dla środowiska rozwiązań, dla tworzenia zielonych dachów, spełniających wiele funkcji, prowadzone są rozliczne badania naukowe na tzw. dachach eksperymentalnych (Biela, 2023), np. w ramach badań prowadzonych przez studentów i doktorantów. W prezentowanej pracy za cel postawiono:

- identyfikację składowych cyklu życia typowego, ekstensywnego dachu zielonego pełnowymiarowego;
- analizę trzech pierwszych etapów LCA dla GR, w obrębie którego prowadzony jest eksperyment naukowy;
- obliczenie śladu węglowego analizowanego dachu.



Iceland Liechtenstein Norway grants

Spodziewanym efektem analizy będzie wskazanie funkcjonalnej jednostki GRs (Campiotti i in., 2015), którą będzie można wykorzystać do oszacowania śladu węglowego np. pełnowymiarowego dachu.

Ekstensywne dachy zielone – budowa i funkcje

Ekstensywne dachy zielone (EGRs), to nowoczesna modyfikacja koncepcji dachu-ogrodu. Charakteryzują się one płytszym podłożem, w porównaniu do dachów intensywnych, wymagają mniej konserwacji i mają o wiele ściślej określoną funkcję, niż intensywne dachy mieszkalne czy ogrody dachowe (Dunnet i Kingsbury, 2004). Ich przeznaczeniem jest funkcja przyrodnicza. Ekstensywne dachy zielone, zwane „eco roof” mają płytkie warstwy korzenienia się roślin, znacznie lżejsze systemy w porównaniu do dachów intensywnych, o ciężarze od 60 do 150 kg·m⁻², w których głębokość podłoża wynosi zwykle od 5 do 15 cm (Raji i in., 2015) lub 2-20 cm (Rabiński i in., 2013).

W najprostszej konstrukcji ekstensywne dachy zielone składają się z warstwy izolacyjnej, membrany hydroizolacyjnej oraz warstwy substratu. GRs pełnią funkcje w gospodarowaniu wodami opadowymi, zatrzymywaniu ciepła w budynkach czy ograniczaniem zagrożeń pożarowych (Bass i in., 2007). Stosunkowo niewielka grubość warstwy substratu dachów ekstensywnych warunkuje dobór gatunków roślin o płytkim systemie korzeniowym.

Dachy zielone, niezależnie od typu, reprezentują klasę technologii, którą można uznać za bioinżynierię lub biomimikrę. Naśladują bowiem ekosystemy funkcjonujące w środowisku



Iceland Liechtenstein Norway grants

przyrodniczym, zapewniając równocześnie szereg usług ekosystemowych poprzez tworzenie płytkich siedlisk glebowych wraz z towarzyszącą im różnorodnością biologiczną (Benvenuti, 2014).

Czym jest LCA i jakie ma znaczenie dla środowiska?

Wraz z potrzebą poszukiwania coraz to nowszych rozwiązań zmniejszających negatywne oddziaływanie działalności człowieka na elementy środowiska przyrodniczego, narodziła się nowa technika z zakresu procesów zarządczych, zwana Ekologiczną Oceną Cyklu Życia (*LCA – Life Cycle Assessment*). Jest to narzędzie analityczne, służące do systematycznej oceny aspektów środowiskowych systemu produktu lub usługi, na wszystkich etapach jego cyklu życia. LCA to przydatna technika naukowa, umożliwiająca ocenę wpływu praktyki, produktu lub procesu na środowisko (ISO 14040, 2006).

Narzędzie to wspomaga podejmowanie decyzji związanych z wyborem oraz optymalizacją dostępnych rozwiązań technologicznych (Maria Michałowska, 2021). Wykorzystywane jest zarówno do oceny pojedynczych produktów, materiałów czy działań organizacji, jak i złożonych procesów produkcyjnych.

LCA funkcjonuje w ramach systemów zarządzania ISO i pozwala oszacować wpływ na środowisko na wszystkich 5 etapach cyklu życia:

- wydobycia materiałów;
- transportu;
- produkcji/montażu/budowy;



Iceland Liechtenstein Norway grants

- eksploatacji;
- utylizacji.

Podczas analizy LCA uwzględnia się nie tylko wpływ na poszczególne elementy środowiska ale i na całe ekosystemy oraz zużycie poszczególnych zasobów, co pozwala na pełną ocenę wpływu danego produktu na elementy środowiska przyrodniczego.

Jak definiuje UNEP: „LCA jest procesem oceny efektów, jaki dany wyrób wywiera na środowisko podczas całego życia, poprzez wzrost efektywnego zużycia zasobów i zmniejszenie obciążeń środowiska. (...)”.

Badania w ramach Środowiskowej Oceny Cyklu Życia prowadzone są w 4 fazach, z których każda posiada wytyczne co do techniki jej przeprowadzania ujęte w normie PE-EN ISO 14040:2006. I tak, norma PrPN-EN 14041 prezentuje dwie pierwsze fazy LCA – określenie celu i zakresu oraz analizę zbioru wejść i wyjść, norma PrPN-EN ISO 14042 przedstawia fazę samej oceny wpływu na środowisko LCIA (*Life Cycle Impact Assessment*), a ostatnia z nich PrPN-EN ISO 14043 poświęcona została etapowi interpretacji (ISO 14040:2006, 2011).

Przeprowadzenie LCA i odpowiednia interpretacja wyników pozwalają zrozumieć, z czego w istocie składa się dany produkt i jak etap jego wytworzenia oddziałuje na środowisko (Samson-Bręk, 2012). Pozyskane w ten sposób informacje, przyczynić się mogą do kreowania bardziej ekonomicznego, wydajnego, a nawet mniej kosztownego cyklu życia produktu. Działania polegające na zmniejszeniu negatywnego oddziaływania dachu zielonego na elementy środowiska, począwszy od momentu wydobycia surowców, aż po etap unieszkodliwiania, są znaczącym krokiem w kierunku zrównoważonego rozwoju.



Iceland Liechtenstein Norway grants

Materialy i metody

Wstępna analiza wpływu na środowisko dachu zielonego

a. Zakres analizy

We wstępnej analizie badaniu poddane zostały poszczególne elementy typowego ekstensywnego zielonego dachu, dostępnego u polskich producentów i wykonawców oraz wyliczony został ślad węglowy poszczególnych procesów. Wstępna analiza pozwoliła na zastosowanie otrzymanych wyników we właściwej analizie LCA dachu zielonego.

Ze względu na eksperymentalny charakter badanego dachu, który jest przedmiotem właściwej analizy, analiza wstępna została przeprowadzona dla trzech pierwszych etapów cyklu życia tj. wydobycia surowców, transportu i budowy.

Badany dach eksperymentalny służy do prowadzenia badań naukowych nad roślinnością wprowadzoną, a pochodzącą z obszarów o podobnych warunkach jak te panujące na ekstensywnym dachu zielonym, zgodnie z ideą *habitat template approach* (Lundholm, 2006) - w analizowanym przypadku z terenów zwałowiska odpadów z górnictwa węgla kamiennego, tzw. hałdy. Nie został on zbudowany w celach eksploatacyjnych, dlatego też rozważono etap budowy dachu, a etap eksploatacji i utylizacji został pominięty.

b. Analiza zbioru wejść i wyjść w odniesieniu do typowej konstrukcji dachu zielonego



Iceland Liechtenstein Norway grants

W celu dokonania wstępnej analizy elementów, z których zbudowane są typowe ekstensywne dachy zielone, zbadano dostępne na rynku oferty producentów. Wyłoniono model dachu zielonego, który składał się ze względnie największej liczby poszczególnych warstw, tj.: paroizolacji, termoizolacji, hydroizolacji, maty ochronnej, maty drenażowej, warstwy filtrującej, substratu i warstwy roślin.

Jako dane wejściowe wskazano materiały i surowce potrzebne do budowy dachu oraz szacunkowe nakłady energii, zużycie paliwa wody jakie były potrzebne do ich wyprodukowania czy podlewania w okresach suszy (tab. 1).

Tabela 1. Zestawienie danych wejściowych (opracowanie własne: Z. Bedlińska).

Dane wejściowe	
Zużycie energii elektrycznej	Zużycie energii elektrycznej podczas wydobycia surowców, produkcji materiałów i transportu
Zużycie paliw	Zużycie paliwa podczas wydobycia surowców, produkcji materiałów i transportu
Woda	Woda zużyta w procesach produkcyjnych oraz do podlania dachu w przypadku suszy
Materiały/surowce potrzebne do stworzenia dachu	

Iceland 
Liechtenstein
Norway grants

Paroizolacja	Folia paroizolacyjna wykonana z polietylenu (PE)
Termoizolacja	Styropian - polistyren ekspandowany (EPS) 100
Hydroizolacja	Membrana wykonana z tworzywa sztucznego otrzymywanego z monomerów etylenowo-propylenowo-dienowych (EPDM) – kauczuk syntetyczny
Mata ochronna	Geowłóknina ochronna 300 g włókien polipropylenowych
Mata drenażowa	Mata drenażowa 2,5 cm wykonana z polietylenu wysokiej gęstości (HDPE)
Warstwa filtrująca	Geowłóknina filtracyjna wykonana z polipropylenu (PP)
Substrat	Substrat ekstensywny: pumeks 65%, kompost 30%, zeolit 5% 6-8 cm
Rośliny	Mszaki, Rozchodniki, Trawy, Rojniki, Sukulenty

Jako dane wyjściowe określono główny produkt – ekstensywny dach zielony, emisje do powietrza powstające w procesach produkcyjnych czy emisja tlenu przez rośliny, wodę zużytą w procesach produkcyjnych oraz ewentualne odpady zielone (tab. 2).

Tabela 2. Zestawienie danych wyjściowych (opracowanie własne: Z. Bedlińska).

Dane wyjściowe	
Produkt główny	Zielony dach

Emisje	Emisja tlenu przez rośliny w procesie fotosyntezy, emisje w procesach produkcyjnych
Woda	Woda zużyta w procesach chłodniczych i produkcyjnych
Odpady zielone	Chwasty, obumarłe rośliny

c. Faza LCIA oraz obliczanie śladu węglowego procesów i produktów

W kolejnym etapie analizowano wpływ na środowisko procesów produkcyjnych poszczególnych komponentów (tab. 3) wraz z transportem (tab. 4) na miejsce montażu dachu oraz wyliczono ich ślad węglowy. Ślad węglowy został wyliczony dla 1 kg produktu.

Wpływ na środowisko został oszacowany na podstawie śladu węglowego. W ten sposób otrzymane dane, mogą służyć do obliczenia śladu węglowego zielonego dachu, o dowolnych wymiarach, a także analizy jego wpływu na środowisko.

Do określenia wpływu na środowisko konkretnych składowych dachu oraz wyliczenia ich śladu węglowego użyto darmowego programu OpenLCA (<https://www.openlca.org/>).

Do programu wgrano bazę danych „*Environmental Footprint (PEF database)*” dostępną w serwisie OpenLCA Nexus (<https://nexus.openlca.org/>). Dla porównania skorzystano także z gotowej brytyjskiej bazy obliczania śladu węglowego, dostępnej na stronie www.gov.uk w zakładce „*Government conversion factors for company reporting of greenhouse gas emissions*”.

Dla określenia przybliżonego śladu węglowego substratu ekstensywnego, skorzystano z już wcześniej wyliczonego śladu tego typu substratu, co zostało zawarte w publikacji „*Carbon*

Iceland Liechtenstein Norway grants

footprint of green roof installation on school buildings in Greek Mediterranean climatic region” (Androutsopoulos i in., 2019).

Tabela 3. Zestawienie wpływu na środowisko przyrodnicze procesów produkcyjnych poszczególnych komponentów zielonego dachu oraz ich śladu węglowego (opracowanie własne: Z. Bedlińska, za: openLCA – Environmental Footprint (PEF database) [26.07.2023]; www.gov.uk [26.07.2023]; Androutsopoulos i in., 2019).



PROCES	WPŁYW	ŚLAD WĘGLOWY
Wytwarzanie PE/ Folia plastikowa	<ul style="list-style-type: none"> - zakwaszenie - zmiana klimatu (emisja CO₂) - eutrofizacja - ekotoksyczność - toksyczność dla ludzi - promieniowanie jonizujące - wykorzystanie terenu - zubożenie warstwy ozonowej - zanieczyszczenie cząstkami stałymi - fotochemiczne tworzenie ozonu - zużycie paliw kopalnych - zużycie minerałów i metali - zużycie wody 	<p>2,095 kg eq CO₂ [1 kg] (openLCA)/</p> <p>2,560 kg eq CO₂ [1 kg] (www.gov.uk)</p> <p>2,328 kg eq CO₂ [1 kg] wartość uśredniona</p>
Wytwarzanie kauczuku syntetycznego EPDM	<ul style="list-style-type: none"> - zakwaszenie - zmiana klimatu (emisja CO₂) - eutrofizacja 	<p>3,671 kg eq CO₂ [1 kg] (openLCA)</p>

Iceland
Liechtenstein
Norway grants



	<ul style="list-style-type: none">- ekotoksyczność- toksyczność dla ludzi- promieniowanie jonizujące- wykorzystanie terenu- zubożenie warstwy ozonowej- zanieczyszczenie cząstkami stałymi- fotochemiczne tworzenie ozonu- zużycie paliw kopalnych- zużycie minerałów i metali- zużycie wody	
--	---	--

Iceland
 Liechtenstein
 Norway grants

<p>PS wraz z formowaniem</p>	<ul style="list-style-type: none"> - zakwaszenie - zmiana klimatu (emisja CO2) - eutrofizacja - ekotoksyczność - toksyczność dla ludzi - promieniowanie jonizujące - wykorzystanie terenu - zubożenie warstwy ozonowej - zanieczyszczenie cząstkami stałymi - fotochemiczne tworzenie ozonu - zużycie paliw kopalnych - zużycie minerałów i metali - zużycie wody 	<p>3,764 kg eq CO₂ [1 kg] (www.gov.uk)</p>
------------------------------	--	---

Iceland
Liechtenstein
Norway grants

<p>Wytwarzanie włókien polipropylenowych/ PP wraz z formowaniem</p>	<ul style="list-style-type: none"> - zakwaszenie - zmiana klimatu (emisja CO₂) - eutrofizacja - ekotoksyczność - toksyczność dla ludzi - promieniowanie jonizujące - wykorzystanie terenu - zubożenie warstwy ozonowej - zanieczyszczenie cząstkami stałymi - fotochemiczne tworzenie ozonu - zużycie paliw kopalnych - zużycie minerałów i metali - zużycie wody 	<p>0,429 kg eq CO₂ [1 kg] (openLCA)/ 3,091 kg eq CO₂ [1 kg] (www.gov.uk)</p> <p>1,76 kg eq CO₂ [1 kg] wartość uśredniona</p>
---	---	--

Iceland
Liechtenstein
Norway grants

<p>HDPE wraz z formowaniem</p>	<ul style="list-style-type: none"> - zakwaszenie - zmiana klimatu (emisja CO2) - eutrofizacja - ekotoksyczność - toksyczność dla ludzi - promieniowanie jonizujące - wykorzystanie terenu - zubożenie warstwy ozonowej - zanieczyszczenie cząstkami stałymi - fotochemiczne tworzenie ozonu - zużycie paliw kopalnych - zużycie minerałów i metali - zużycie wody 	<p>3,256 kg eq CO₂ [1 kg] (www.gov.uk)</p>
<p>Wytwarzanie substratu ekstensywnego - podłoże z grubego kruszywa (pumeks, kompost, zeolit)</p>	<p>Brak danych z programu OpenLCA</p>	<p>0,205 kg eq CO₂ [1 kg] (Androutopoulos i in., 2019)</p>

Tabela 4. Zestawienie śladów węglowych różnego rodzaju transportu (opracowanie własne: Z. Bedlińska, za: www.gov.uk [26.07.2023]).

Iceland 
 Liechtenstein
 Norway grants

PROCES	WPŁYW	ŚLAD WĘGLOWY
<p>Transport surowców do miejsca montażu zielonego dachu (transport vanem do 1,3 t, benzyna)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - zakwaszenie - zmiana klimatu (emisja CO₂) - eutrofizacja - ekotoksyczność - toksyczność dla ludzi - wykorzystanie terenu - zanieczyszczenie cząstkami stałymi - zużycie paliw kopalnych 	<p>0,182 kg eq CO₂ [1 km] (www.gov.uk)</p>
<p>Transport surowców do miejsca montażu zielonego dachu transport vanem do 1,3 t, diesel)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - zakwaszenie - zmiana klimatu (emisja CO₂) - eutrofizacja - ekotoksyczność - toksyczność dla ludzi - wykorzystanie terenu - zanieczyszczenie cząstkami stałymi - zużycie paliw kopalnych 	<p>0,142 kg eq CO₂ [1 km] (www.gov.uk)</p>

Iceland 
 Liechtenstein
 Norway grants

<p>Transport surowców do miejsca montażu zielonego dachu (transport samochodem, rozmiar średni, benzyna)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - zakwaszenie - zmiana klimatu (emisja CO₂) - eutrofizacja - ekotoksyczność - toksyczność dla ludzi - wykorzystanie terenu - zanieczyszczenie cząstkami stałymi - zużycie paliw kopalnych 	<p>0,178 kg eq CO₂ [1 km] (www.gov.uk)</p>
<p>Transport surowców do miejsca montażu zielonego dachu (transport samochodem, rozmiar średni, diesel)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - zakwaszenie - zmiana klimatu (emisja CO₂) - eutrofizacja - ekotoksyczność - toksyczność dla ludzi - wykorzystanie terenu - zanieczyszczenie cząstkami stałymi - zużycie paliw kopalnych 	<p>0,167 kg eq CO₂ [1 km] (www.gov.uk)</p>

Iceland Liechtenstein Norway grants

Analiza wpływu dachu zielonego na środowisko– studium przypadku w odniesieniu do jednostki funkcjonalnej dachu eksperymentalnego

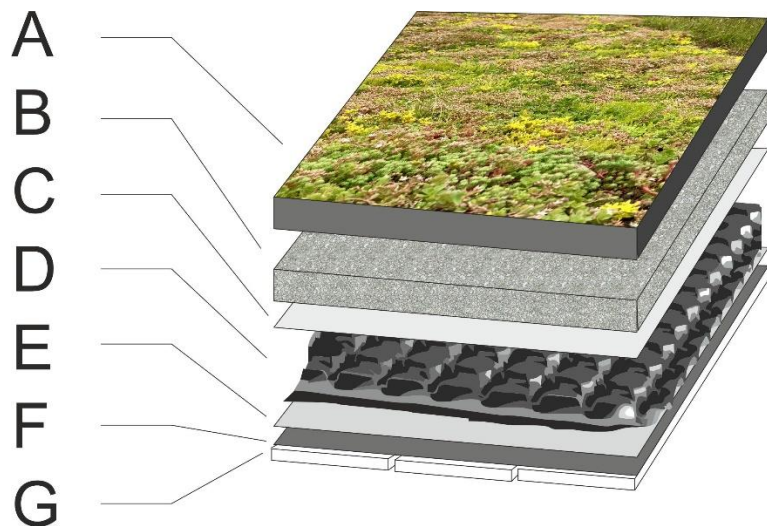
Jednostkę funkcjonalną zdefiniowano jako 4 m² ekstensywnego zielonego dachu, zbudowanego na potrzeby eksperymentu naukowego.

a. Cel i zakres analizy case study

Badania przeprowadzono na modelowych istniejących 5 dachach zielonych w Polsce południowej (50°16'22"N, 18°44'43"E), przygotowanych według systemu Optigrün (ryc. 1) w 2022 roku. Powierzchnia każdego z nich wynosi 4m². Na dachu zaplanowano eksperyment badawczy w zakresie wykorzystania gatunków roślin z terenów przemysłowych, dla potrzeb zielonej infrastruktury miasta w odniesieniu do minimalizacji skutków zmian klimatu.



Iceland
Liechtenstein
Norway grants



Ryc. 1. Poszczególne warstwy analizowanego zielonego dachu (opracowanie własne: Magdalena Biela).

Objaśnienia: **A** - warstwa z roślinami; **B** - substrat wulkaniczny ZIDA -15 cm; **C** - geowłóknina filtracyjna firmy Optigrün; **D** - systemowa mata drenażowa firmy Optigrün FKD 25; **E** - geowłóknina chłonno-ochronna typ RMS 300 firmy Optigrün; **F** - hydroizolacja membrana EPDM „Resitrix SKW Full Bond”; **G** - konstrukcja dachu.

Wyniki ze wstępnej analizy, w oparciu o wykaz w tabeli 3, wykorzystano w analizie właściwej, chcąc wskazać wartość śladu węglowego i określić tym samym wpływ na środowisko istniejącego lub planowanego do realizacji dachu zielonego.

b. Analiza zbioru wejść i wyjść



Iceland Liechtenstein Norway grants

Ze względu na charakter badawczy dachów, są one wykonane z mniejszej ilości warstw niż wykazany typowy dach, dla którego wskazano wartości śladu węglowego. Nie znajdują się one także na takiej wysokości jak dachy budynków, a są wyniesione jedynie około 1,2 metra nad powierzchnię ziemi, na stołach tzw. badawczych (ryc. 2). Każdy z dachów posiada odwodnienie w postaci rynny, która odprowadza wodę do zbiorników, celem monitorowania retencji.



Ryc. 2. Projekt stołu badawczego, na którym znajduje się analizowany zielony dach (oprac. własne: M. Biela).

Iceland Liechtenstein Norway grants

Badany zielony dach składa się z 6 warstw: podłoża, hydroizolacji, warstwy ochronnej, maty drenażowej, warstwy filtracyjnej i substratu wraz z roślinami oraz rynny odwadniającej. Na jeden dach o powierzchni 4 m² zużyto kolejno:

- 0,23 m³ drewna sosnowego – konstrukcja stołu badawczego (G)
- 5,25 m² membrany EPDM Restrix SKW Full Bond – hydroizolacja (F)
- 4 m² geowłókniny chłonno-ochronnej typ RMS 300 – warstwa ochronna (E)
- 4 m² maty drenażowej FKD 25 (D)
- 4 m² geowłókniny filtracyjnej – warstwa filtracyjna (C)
- 0,6 m³ (15 cm) substratu ekstensywnego wulkanicznego (B)
- 2,3 mb rynny PVC o średnicy 10 cm – odwodnienie

Tabela 5. Dane wejściowe – analizowany dach eksperymentalny (opracowanie własne: Z. Bedlińska).

Dane wejściowe	
Zużycie energii elektrycznej	Zużycie energii elektrycznej podczas wydobycia surowców, produkcji materiałów i transportu
Zużycie paliw	Zużycie paliwa podczas wydobycia surowców, produkcji materiałów i transportu
Woda	Woda zużyta w procesach produkcyjnych oraz do podlania dachu w przypadku suszy
Materiały/surowce potrzebne do stworzenia dachu	

Iceland
Liechtenstein
Norway grants

Podłoże	Deski z drewna sosnowego (0,23 m ³)
Hydroizolacja	Membrana EPDM Restrix SKW Full Bond – kauczuk syntetyczny (5,25 m ²)
Warstwa ochronna	Geowłóknina chłonno-ochronna typ RMS 300 (4 m ²)
Mata drenażowa	Mata drenażowa (4 m ²) wykonana z polietylenu wysokiej gęstości (HDPE)
Warstwa filtrująca	Geowłóknina filtracyjna wykonana z polipropylenu (PP)
Substrat	Substrat ekstensywny – wulkaniczny Zida (0,6 m ³)
Rośliny	<i>Geranium robertianum</i> , <i>Calamagrostis epigejos</i> , <i>Lupinus polphyllus</i> , <i>Echium Vulgare</i>
Rynna odwodnieniowa	Rynna PVC o średnicy 10 cm (2,3 m)

Tabela 6. Dane wyjściowe – analizowany dach (opracowanie własne: Z. Bedlińska).

Dane wyjściowe	
Produkt główny	Zielony dach
Emisje	Emisja tlenu przez rośliny w procesie fotosyntezy, emisje w procesach produkcyjnych
Woda	Woda zużyta w procesach chłodniczych i produkcyjnych

Iceland Liechtenstein Norway grants

Odpady zielone	Chwasty, obumarłe rośliny
----------------	---------------------------

c. Faza LCIA

W tej fazie określono wpływ na środowisko na podstawie wyników uzyskanych w analizie wstępnej. Ślad węglowy został wyliczony na podstawie wagi poszczególnych komponentów za pomocą wzoru:

$$\begin{aligned} \text{waga produktu [kg]} \times \text{ślad węglowy procesu [kg eq CO}_2\text{]} \\ = \text{ślad węglowy produktu [kg eq CO}_2\text{]} \end{aligned}$$

**waga produktu [kg] = objętość/powierzchnia produktu × waga 1 m²/m³ produktu*

Do obliczenia śladu węglowego użyto wagi produktu, która została wyliczona na podstawie jego objętości lub powierzchni i wagi m³, bądź m² produktu w przypadku bardzo cienkich warstw. Waga poszczególnych produktów [m²/m³] została zaczerpnięta ze stron producentów, z charakterystyki produktu. Posiadając wagę 1 m²/m³ produktu oraz ilość jaka została zużyta podczas budowy dachu, można w prosty sposób stosując zasadę proporcji obliczyć ile ważą poszczególne komponenty.

Iceland Liechtenstein Norway grants

Wyniki

Ślad węglowy 4 m² badanego ekstensywnego zielonego dachu wynosi **215,38 kg eq CO₂ [4 m²]**. Szczegółowe wyniki zawiera tabela 7.

Tabela 7. Zestawienie wpływu na środowisko przyrodnicze procesów produkcyjnych poszczególnych produktów oraz ich śladu węglowego (opracowanie własne: Z. Bedlińska, za: openLCA - Environmental Footprint (PEF database) [26.07.2023]; www.gov.uk [26.07.2023]; Androutsopoulos i in., 2019).



Iceland
Liechtenstein
Norway grants

PROCES	WPLYW	ŚLAD WĘGLOWY
Podłoże		
Produkcja drewna	<ul style="list-style-type: none"> - zakwaszenie - zmiana klimatu (emisja CO₂) - eutrofizacja - ekotoksyczność - toksyczność dla ludzi - promieniowanie jonizujące - wykorzystanie terenu - zubożenie warstwy ozonowej - zanieczyszczenie cząstkami stałymi - fotochemiczne tworzenie ozonu - zużycie paliw kopalnych - zużycie minerałów i metali - zużycie wody 	<p>0,313 kg eq CO₂ [1 kg] (www.gov.uk)</p> <p>0,448 kg eq CO₂ [1 kg] (openLCA)</p> <p>0,381 kg eq CO₂ [1 kg] wartość uśredniona</p>
Do stworzenia zielonego dachu zużyto 0,23 m ³ ; waga 126,5 kg		39,6 kg eq CO₂
Hydroizolacja		
Wytwarzanie kauczuku syntetycznego EPDM	<ul style="list-style-type: none"> - zakwaszenie - zmiana klimatu (emisja CO₂) - eutrofizacja 	3,671 kg eq CO₂ [1 kg] (openLCA)

Iceland 
 Liechtenstein
 Norway grants

	<ul style="list-style-type: none"> - ekotoksyczność - toksyczność dla ludzi - promieniowanie jonizujące - wykorzystanie terenu - zubożenie warstwy ozonowej - zanieczyszczenie cząstkami stałymi - fotochemiczne tworzenie ozonu - zużycie paliw kopalnych - zużycie minerałów i metali - zużycie wody 	
Do stworzenia zielonego dachu zużyto 5,25 m ² , waga 6,9 kg		25,33 kg eq CO₂

Iceland
Liechtenstein
Norway grants

Mata ochronna oraz Mata filtrująca		
Wytwarzanie włókien polipropylenowych/ PP wraz z formowaniem	<ul style="list-style-type: none"> - zakwaszenie - zmiana klimatu (emisja CO2) - eutrofizacja - ekotoksyczność - toksyczność dla ludzi - promieniowanie jonizujące - wykorzystanie terenu - zubożenie warstwy ozonowej - zanieczyszczenie cząstkami stałymi - fotochemiczne tworzenie ozonu - zużycie paliw kopalnych - zużycie minerałów i metali - zużycie wody 	<p>0,429 kg eq CO₂ [1 kg] (openLCA)</p> <p>3,091 kg eq CO₂ [1 kg] (www.gov.uk)</p> <p>1,76 kg eq CO₂ [1 kg] wartość uśredniona</p>
Do stworzenia zielonego dachu użyto: 4 m ² + 4 m ² , waga 2,4 kg		4,22 kg eq CO₂
Mata drenażowa		

Iceland 
 Liechtenstein
 Norway grants

HDPE wraz z formowaniem	<ul style="list-style-type: none"> - zakwaszenie - zmiana klimatu (emisja CO2) - eutrofizacja - ekotoksyczność - toksyczność dla ludzi - promieniowanie jonizujące - wykorzystanie terenu - zubożenie warstwy ozonowej - zanieczyszczenie cząstkami stałymi - fotochemiczne tworzenie ozonu - zużycie paliw kopalnych - zużycie minerałów i metali - zużycie wody 	<p>3,256 kg eq CO₂ [1 kg] (www.gov.uk)</p>
Do stworzenia zielonego dachu użyty: 4 m ² , waga 3.2 kg		10,42 kg eq CO₂
Substrat ekstensywny		



Iceland
Liechtenstein
Norway grants



<p>Wytwarzanie substratu ekstensywnego</p>	<ul style="list-style-type: none"> - zakwaszenie - zmiana klimatu (emisja CO2) - eutrofizacja - ekotoksyczność - toksyczność dla ludzi - promieniowanie jonizujące - wykorzystanie terenu - zubożenie warstwy ozonowej - zanieczyszczenie cząstkami stałymi - fotochemiczne tworzenie ozonu - zużycie paliw kopalnych - zużycie minerałów i metali - zużycie wody 	<p>0,205 kg eq CO₂ [1 kg] (Androutsopoulos i in., 2019)</p>
<p>Do stworzenia zielonego dachu użyty: 0,6 m³, waga 600 kg</p>		<p>123 kg eq CO₂</p>

Iceland
Liechtenstein
Norway grants



Rywna odwodnieniowa		
Wytwarzanie PVC wraz z formowaniem	<ul style="list-style-type: none"> - zakwaszenie - zmiana klimatu (emisja CO2) - eutrofizacja - ekotoksycznosc - toksycznosc dla ludzi - promieniowanie jonizujace - wykorzystanie terenu - zubozenie warstwy ozonowej - zanieczyszczenie czastkami stalymi - fotochemiczne tworzenie ozonu - zuzycie paliw kopalnych - zuzycie mineraLOW i metali - zuzycie wody 	<p>3,399 kg eq CO₂ [1 kg] (www.gov.uk)</p>
Do stworzenia zielonego dachu zuzyto: 2.3 m, ø10 cm, waga 1.15 kg		3,91 kg eq CO₂
Rośliny		

Iceland
Liechtenstein
Norway grants

Zebranie roślin z hałdy górniczej	- zmniejszenie wielkości populacji gatunków <i>Geranium robertianum</i> , <i>Calamagrostis epigejos</i> , <i>Lupinus polphyllus</i> , <i>Echium vulgare</i>	0* kg eq CO ₂ [1 km] *Wynik wynosi zero, ponieważ rośliny nie są usuwane, a jedynie przesadzane w inne miejsce.
Transport:		0,178 kg eq CO₂ [1 km] (www.gov.uk)
Długość trasy: 50 km		8,9 kg eq CO₂
Całkowity ślad węglowy zielonego dachu:		215,38 kg eq CO₂

a. Porównanie zielonego dachu eksperymentalnego z typowym zielonym dachem

Eksperymentalny zielony dach (DE) różni się od typowego zielonego dachu (DT) jedynie brakiem izolacji termicznej w postaci np. styropianu/styrodurowa oraz paroizolacji. Do jego konstrukcji użyto jednak materiałów, które w modelowych dachach nie są wykorzystywane – rynny, która jest elementem dachu, ale nie jest *stricte* elementem zielonego dachu oraz desek.

Ślad węglowy 4 m² styropianu EPS 100 – zakładając, że jest on grubości 10 cm, waga 7,2 kg – wynosi 27,1 kg eq CO₂. Ślad węglowy 4 m² folii paroizolacyjnej – waga 0,54 kg – wynosi 1,257 kg eq CO₂. Oznacza to, że 4 m² DT, mają ślad węglowy wielkości **191,33 kg eq**

Iceland Liechtenstein Norway grants

CO₂ [4m²], przy założeniu, że dach typowy składałby się z komponentów tego samego rodzaju tj. ten sam producent, te same wymiary i ilości poszczególnych materiałów. Porównanie śladu węglowego DT ze śladem węglowym DE zostało zestawione w tabeli 8. Porównanie przedstawia ślad węglowy DE i DT bez podłoża i odwodnienia w postaci rynny, ponieważ te elementy nie zostały uwzględnione jako komponenty w analizie wstępnej. Porównanie nie zawiera także roślin, ponieważ nie mają one śladu węglowego.

Tabela 8. Porównanie dachu eksperymentalnego i dachu typowego pod kątem ich śladu węglowego (opracowanie własne: Z. Bedlińska)

Warstwa	Dach typowy [4 m ²]	Dach eksperymentalny [4 m ²]
Paroizolacja	1,257 kg eq CO ₂	-
Termoizolacja	27,1 kg eq CO ₂	-
Hydroizolacja	25,33 kg eq CO ₂	25,33 kg eq CO ₂
Mata ochronna	2,11 kg eq CO ₂	2,11 kg eq CO ₂
Mata drenażowa	10,42 kg eq CO ₂	10,42 kg eq CO ₂
Warstwa filtrująca	2,11 kg eq CO ₂	2,11 kg eq CO ₂
Substrat	123 kg eq CO ₂	123 kg eq CO ₂
Suma:	191,33 kg eq CO₂	162,97 kg eq CO₂

Iceland Liechtenstein Norway grants

Podsumowanie i dyskusja

Analiza cyklu życia DE i DT na środowisko pokazała, że składają się one w głównej mierze z materiałów sztucznych, a część z nich nie nadaje się do recyklingu - PVC czy polipropylen. Aby taki dach mógł powstać muszą zostać wydobyte surowce, trzeba przeprowadzić procesy produkcyjne, które emitują szkodliwe związki do atmosfery, aż w końcu trzeba gotowe komponenty przetransportować do użytkownika dachu, co również jest związane z emisją zanieczyszczeń.

Porównanie wyników z innymi badaniami naukowymi stwarza trudności, najczęściej ze względu na brak analogicznych jednostek – np. kg eq CO₂/rok (Androutsopoulos i in., 2019).

Wynik śladu węglowego ekstensywnego dachu zielonego, uzyskany przez Gunatilake i in. (2021) wyniósł 150,99 kg eq CO₂ [m²]. Badany dach znajdował się na Sri Lance, która cechuje się klimatem tropikalnym, co wpłynęło na zastosowanie innych materiałów takich jak piasek, pokruszone skały czy farba. Dach ten cechował się też znacznie mniejszą liczbą warstw z tworzyw sztucznych.

Ślad węglowy 4 m² DE jest zbliżony do śladu węglowego DT, aczkolwiek mniejszy. Prowadzi to do konkluzji, że nawet prowadząc badania, generujemy dużo negatywnych oddziaływań.



Iceland Liechtenstein Norway grants

Całkowita waga 4 m² eksperymentalnego dachu wynosi 740,15 kg, co daje ślad węglowy równy **0,29 kg eq CO₂ [1 kg]**. Jest to stosunkowo mało, porównując ten wynik do śladu węglowego niektórych produktów spożywczych np.: kawy – 17 kg eq CO₂ [1 kg], mleka – 3 kg eq CO₂ [1 kg] czy wołowiny – 60 kg eq CO₂ [1 kg] (Nemecek i Poor, 2018). Jednak należy zauważyć, że produkty te najczęściej nabywa się w skali kilkuset gram czy kilku kilogramów, podczas gdy jeden zielony dach potrafi mieć powierzchnię przykładowo 100 m², ważąc wtedy około 18,5 t.

Dostępne modele zielonych dachów pozostawiają wiele do życzenia, w kontekście minimalizacji negatywnych wpływów na środowisko przyrodnicze ich produkcji. Obecny dobór materiałów sprawia, że zielony dach, w głównej mierze jest „dachem plastikowym”.

Próbując naśladować naturę, wciąż jesteśmy dalecy od doskonałości, którą ona sama się cechuje. Należy więc pamiętać, że mimo coraz to lepszych, mniej szkodliwych rozwiązań, nasze działania wciąż mają negatywny wpływ na środowisko.

Stwarza to konieczność kompensacji negatywnych oddziaływań np. poprzez wprowadzenie roślin, które pochłaniać będą dwutlenek węgla z powietrza oraz ciągłego prowadzenia badań naukowych nad możliwą alternatywną konstrukcją zielonych dachów.



Iceland Liechtenstein Norway grants

Bibliografia

Abass F., Ismail L.H., Wahab I.A. and Elgadi A.A., 2020. *A Review of Green Roof: Definition, History, Evolution and Functions The 2nd Global Congress on Construction, Material and Structural Engineering IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 713*, doi:10.1088/1757-899X/713/1/012048

Arabi R., Shahidan M.F., Kamal M.S.M., Bin Jaafar M.F.Z. and Rakhshandehroo M., 2015. *Mitigating Urban Heat Island Through Green Roofs Curr. World Environ. 10 Special-Issue1* 918–927

Costanza R., d'Arge R., de Groot R., Farber S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., O'Neill R.V., Paruelo J., Raskin R.G., Sutton P., van den Belt M., 1997. *The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature*, 387: 253-260

Benvenuti S., 2014. *Wildflower green roofs for urban landscaping, ecological sustainability and biodiversity. Landscape and Urban Planning*, 124: 151-161

Biela M., 2023. *Plant's functional diversity in creation of ecosystems. Tagungsband / Conference Transcript Weltkongress Gebäudegrün / World Green Infrastructure Congress WGIC 27-29. June 2023*, p. 275. ISBN: 978-3-00-075742-6



Iceland Liechtenstein Norway grants

Brachet A., Schiopu N., Clergeau P., 2019. *Biodiversity impact assessment of building's roofs based on life cycle assessment methods*. *Build. Environ.*, 158: 133-144, 10.1016/j.buildenv.2019.04.014

Çağlak S., Esringü A., Toy S. 2021. *The Importance of Ecosystem Services in Healthy Cities*. *Climate and Health Journal*, Volume 1, Issue 2: 68-73.

Calheiros C.S.C., Castiglione B., Palha P., 2021. *Nature-based solutions for social and environmental responsible new cities: the contribution of green roofs*. In: Stefanakis AI, Nikolaou I (eds.), *Circular Economy and Sustainability*, Volume 2, Elsevier Publishing.

Coutts Ch., Hahn M., 2015. *Green Infrastructure, Ecosystem Services, and Human Health*, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 12, 9768-9798; doi:10.3390/ijerph120809768

Dunnet N., Kingsbury N., 2004. *Planting Green Roofs and Living Walls*, Timber Press, Oregon.

EC (European Commission) (2015) *Nature-based solutions and re-naturing cities. Final Report. Directorate-General for Research and Innovation. Climate Action, Environment, Resource Efficiency and Raw Materials*. ISBN 978-92-79-46051-7. <https://doi.org/10.2777/765301>

Francis R A and Lorimer J., 2011. *Urban reconciliation ecology: The potential of living roofs and walls* *J. Environ. Manage.* 92(6) 1429–1437



Iceland Liechtenstein Norway grants

Gargaria C., Bibbiani C., Fantozzia F., Campiotti C.A., 2016. *Environmental impact of Green roofing: the contribute of a green roof to the sustainable use of natural resources in a life cycle approach. Food for Sustainability and not just food, FlorenceSWIF2015.* Agriculture and Agricultural Science Procedia 8 (2016) 646 – 656 2210-7843 2016

Gong P., Li X., Wang J., Bai Y., Chen B., Hu T., ..., Zhou Y., 2020. *Annual maps of global artificial impervious area (GAIA) between 1985 and 2018. Remote Sensing of Environment.* Vol. 236, 111510. doi:10.1016/j.rse.2019.111510

International Standard ISO 14040:2006, Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework, 2011.

Köhler M., Poll P. H. *Long-term performance of selected old Berlin green roofs in comparison to younger extensive green roofs in Berlin.* Ecological Engineering, 36, Issue 5, 2010, 722-729

Kooijman ED, McQuaid S, Rhodes M-L, Collier MJ, Pill F., 2021. *Innovating with nature: from nature-based solutions to nature-based enterprises.* Sustainability 13:1263. <https://doi.org/10.3390/su13031263>

Kotharkar R., Bagade A., Ramesh A., 2019. *Assessing urban drivers of canopy layer urban heat island: A numerical modeling approach.* Landscape and Urban Planning. Vol. 190, 103586. DOI 10.1016/j. landurbplan.2019.05.017



Iceland Liechtenstein Norway grants

Kotsirisa G, Androutsopoulos A., Polychronis E., Souliotis M., Kavga A., 2019. *Carbon footprint of green roof installation on school buildings in Greek Mediterranean climatic region.* International Journal of sustainable energy, vol. 38, no. 9, 866-883

Lundholm, J.T., 2006. *Green roofs and facades: A habitat template approach.* Urban Habitats 4(1):87–101

McDonald R, Giineralp B, Zipperer W, Marcotullio PJ., 2014. *The future of global urbanization and the environment.* Solut J 5(6): 60–69

Michałowska M., 2021. *Instrumenty Zarządzania Środowiskowego w przedsiębiorstwach.* Zeszyty Naukowe Wydziału Zarządzania GWSH, nr 16: 81-102

Nadeeshani M., Ramachandra T., Gunatilake S. and Zainudeen N., 2021. *Carbon Footprint of Green Roofing: A Case Study from Sri Lankan Construction Industry.* Sustainability 13(12) :6745. DOI: 10.3390/su13126745

Oberndorfer E., 2007. *Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services.* BioScience, 57, 10: 823–833, doi.org/10.1641/B571005

Oberndorfer E., Lundholm J., Bass B., Coffman R., Doshi H., Dunnett N., Gaffin S., Köhler M., Liu K. and Rowe B., 2007. *Green roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions and services.* BioScience, 57 (10):823-832



Iceland Liechtenstein Norway grants

Osmundson T., 1999. *Roof Gardens: History, Design, and Construction* (New York: W.W. Norton)

Poore J., Nemecek T., 2018. *Reducing food's environmental impacts through producers and consumers*. *Science*, 360, 6392: 987-992, doi:10.1126/science.aag0216

Raji B., Tenpierik MJ., van den Dobbelsteen A., 2015. *The impact of greening systems on building energy performance: A literature review*. *Renew Sustain Energy Rev* 45:610-623. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.011>

Samson-Bręk I., 2012. *Zastosowanie metody oceny cyklu życia (LCA) do oszacowania wpływu na środowisko procesu uprawy biomasy przeznaczonej na cele energetyczne*. *Chemik*, 66, 11: 1190-1195

Shafique M., Azam A., Rafiq M., Ateeq M., Luo X., 2020. *An overview of life cycle assessment of green roofs*. *Journal of Cleaner Production*, 250, 119471

Shahmohammad M., Hosseinzadeh M., Dvorak B. et al., 2022. *Sustainable green roofs: a comprehensive review of influential factors*. *Environ Sci Pollut Res* 29, 78228–78254. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23405-x>

Sierka E., Pierzchała Ł., 2022. *Role of reservoirs of urban heat island effect mitigation in human settlements: moderate climate zone*. *JOURNAL OF WATER AND LAND DEVELOPMENT* DOI: 10.24425/jwld.2022.143726 2022, Special Issue: 112–11



Iceland Liechtenstein Norway grants

Spence R., Mulligan H., 1995. *Sustainable development and the construction industry*. *Habitat Int*, 19 (3) (1995), pp. 279-292

Stone B., Hess J.J., Frumkin H., 2010. *Urban form and extreme heat events: are sprawling cities more vulnerable to climate change than compact cities*. *Environmental Health Perspectives*. Vol. 118 (10) p. 1425–1428. DOI 10.1289/ehp.0901879

Ustawa z dnia 27 marca 2003 r. o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym (t.j. Dz. U. z 2023 r. poz. 977)

Vacek P., Struhala K., Matějka L., 2017. *Life-cycle study on semi intensive green roofs*. *Journal of Cleaner Production*, 154: 203-213, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.188>

Weber-Siwirska M., 2013. *Krótką historia zielonych dachów*. W: *Zasady projektowania i wykonywania zielonych dachów i żyjących ścian*. Poradnik dla gmin. Kraków, 17-22

