

PhD Szymon Dawczyński¹⁾
ORCID: 0000-0002-3937-3205

Green roofs in the design of building structures – design challenges and innovative solutions

Zielone dachy w kształtowaniu konstrukcji budowlanych – wyzwania projektowe i innowacyjne rozwiązania

DOI: 10.15199/33.2025.07.15

Abstract. Green roofs are gaining popularity as part of sustainable urban construction, offering numerous environmental, economic and social benefits. The paper identifies design challenges associated with their implementation, such as increased structural loads depending on the system chosen, advanced materials and technologies, including modern monitoring systems. Attention is also given to the development of hybrid roofs, combining green functions with renewable energy production.

Keywords: green roofs; hybrid roofs; innovative materials; monitoring systems; sustainable construction.

Streszczenie. Zielone dachy zyskują na popularności jako element zrównoważonego budownictwa miejskiego, ponieważ zapewniają korzyści ekologiczne, ekonomiczne i społeczne. W artykule wskazano wyzwania projektowe związane z ich realizacją, takie jak zwiększone obciążenia konstrukcji w zależności od wybranego systemu, zaawansowane materiały i technologie, w tym także nowoczesne systemy monitoringu. Zwrócono także uwagę na rozwój dachów hybrydowych, łączących funkcje zieleni z produkcją energii odnawialnej.

Słowa kluczowe: dachy zielone; dachy hybrydowe; innowacyjne materiały; systemy monitoringu; zrównoważone budownictwo.

The modern construction industry is increasingly confronted with the demands for a variety of environmentally friendly solutions to meet the challenges of urbanisation, climate change, environmental degradation and the quality of life of city dwellers. In this context, green roofs, i. e. roofs consisting of layers that allow plants to grow on them, are a key architectural solution that has the potential to contribute to sustainable urban development [1]. Often seen as an innovative solution for contemporary green architecture, the concept has a deep-rooted tradition dating back to antiquity. One of the earliest documented examples of the use of vegetated roofs was the famous Hanging Gardens of Babylon, considered one of the seven wonders of the ancient world [2]. Also in Scandinavian and Alpine traditions, grass roofing was commonly used as a natural thermal insulation and protection from the weather. Although these solutions were primarily practical and local in nature, they formed the foundation for later systemic engineering solutions [3].

Modern green roofs, developed since the 1960s mainly in German-speaking countries, have undergone a significant evolution from simple extensive roofing to advanced intensive systems and multifunctional hybrid structures. Their development has been, and continues to be, a response to urbanisation challenges, such as loss of biologically active areas, excessive sealing of land, degradation of air [4] and water quality, and an increase in the urban heat island effect [5]. In the face of today's climate and urban challenges, traditional approaches to green roof design are proving insufficient. New strategies are required that take into account not only environmental aspects, but also integration with modern tech-

Współczesne budownictwo coraz częściej staje w obliczu wymagań związanych z zastosowaniem rozwiązań proekologicznych, mających sprostać wyzwaniom związanym z urbanizacją, zmianami klimatu, degradacją środowiska i jakością życia mieszkańców miast. W tym kontekście zielone dachy, czyli dachy składające z warstw umożliwiających na nich uprawę roślin, są kluczowym rozwiązaniem architektonicznym, które ma szansę przyczynić się do zrównoważonego rozwoju obszarów miejskich [1]. Koncepcja ta, często postrzegana jako innowacyjne rozwiązanie współczesnej architektury proekologicznej, ma tradycję sięgającą starożytności. Jednym z najwcześniej udokumentowanych przykładów stosowania dachów z roślinnością były słynne Wieszące Ogrody Babilonu, uznawane za jeden z siedmiu cudów świata antycznego [2]. W tradycjach skandynawskich i alpejskich również powszechnie wykorzystywano trawiste pokrycia dachowe, które stanowiły naturalną izolację termiczną i ochronę przed czynnikami atmosferycznymi. Rozwiązania te miały wprawdzie przede wszystkim charakter praktyczny i lokalny, ale jednak stanowiły fundament pod późniejsze systemowe rozwiązania inżynierskie [3].

Współczesne zielone dachy, rozwijane od lat sześćdziesiątych XX wieku przede wszystkim w krajach niemieckojęzycznych, przeszły znaczną ewolucję – od prostych pokryć ekstensywnych do zaawansowanych systemów intensywnych oraz wielofunkcyjnych konstrukcji hybrydowych. Ich rozwój był i nadal jest odpowiedzią na wyzwania urbanizacyjne, takie jak utrata powierzchni biologicznie czynnych, nadmierne uszczelnienie terenu, degradacja jakości powietrza [4] i wód oraz zwiększenie efektu miejskiej wyspy ciepła [5]. W obliczu współczesnych wyzwań klimatycznych i urbanistycznych, tradycyjne podejście

¹⁾ Silesian University of Technology; szymon.dawczynski@polsl.pl

nologies, water management, renewable energy production and adaptation to changing climatic conditions. The use of green roofs on first residential buildings, and now increasingly on public buildings or industrial facilities, offers many environmental, economic and aesthetic benefits, including very good building energy performance, efficient rainwater management, high biodiversity and the creation of urban green spaces [6]. At the same time, these roofs present designers and engineers with new structural, technological and material challenges that require an integrated approach and interdisciplinary knowledge. The dynamic development of material technologies and the emergence of intelligent monitoring systems make it possible to deal with these challenges, opening up new possibilities for the design and operation of these buildings.

The aim of this paper is to discuss the latest trends in green roof design, with a focus on innovative typologies (such as blue, brown and biosolar roofs), advanced materials and intelligent systems for managing the operation of these structures in the context of 21st century urban engineering. The paper attempts to identify current trends and perspectives in the area of green roof engineering in the context of sustainable construction.

Classification of green roofs and their impact on the building structure

The classification of green roofs is based primarily on the thickness of the vegetation layers, the type of vegetation, the functionality and the extent of care and use. On this basis, three main types of green roofs are distinguished [7, 8]:

- **extensive** (photo a), they are characterised by shallow ground layers (typically 8 – 15 cm thick), low-maintenance vegetation (e.g. sedums, mosses) and relatively low load on the supporting structure (typically 0.6 to 1.8 kN/m²); these systems can also be used to retrofit existing buildings (residential or commercial) where the existing structure has limited load-bearing capacity.
- **semi-intensive** (photo b), using intermediate depth substrate layers (typically 15 – 25 cm) and a greater variety of plants (including shrubs), these systems provide a balance between load (1.5 to 3.5 kN/m²), moderate maintenance and ecological function.
- **intensive** (photo c), equipped with deep ground layers (over 25 cm and sometimes reaching up to 150 cm) capable of supporting shrubs, trees and recreational areas; intensive green roofs resemble roof gardens (there are virtually no restrictions on how they can be used), but this involves significant loads that must be taken into account at the design stage (more than 3.5 kN/m²).

The choice of the type of green roof depends not only on the type of vegetation and the thickness of the substrate, but primarily on architectural considerations (e. g. the angle of the roof slope) and structural considerations (in modernized existing buildings, even if structural strengthening is taken into account, there will not always be as much freedom in shaping the green roof as, for example, in newly designed buildings).

Contemporary design challenges

The literature on green roofs is dominated by an approach that focuses on environmental, energy and hydrological

do projektowania dachów zielonych okazuje się niewystarczająca. Wymagane są nowe strategie, które uwzględniają nie tylko aspekty środowiskowe, lecz również integrację z nowoczesnymi technologiami, gospodarką wodną, produkcją energii odnawialnej oraz adaptacją do zmiennych warunków klimatycznych.

Zastosowanie zielonych dachów w obiektach najpierw mieszkalnych, a obecnie coraz częściej na budynkach użyteczności publicznej lub obiektach przemysłowych zapewnia wiele korzyści środowiskowych, ekonomicznych i estetycznych, w tym bardzo dobrą charakterystykę energetyczną budynku, efektywne zarządzanie wodami opadowymi, dużą bioróżnorodność i tworzenie miejskich terenów zielonych [6]. Jednocześnie dachy te stawiają przed projektantami i inżynierami nowe wyzwania konstrukcyjne, technologiczne i materiałowe, które wymagają zintegrowanego podejścia i interdyscyplinarnej wiedzy. Dynamiczny rozwój technologii materiałowych oraz pojawienie się inteligentnych systemów monitorowania umożliwiają radzenie sobie z tymi wyzwaniami, otwierając nowe możliwości w projektowaniu i eksploatacji tych obiektów.

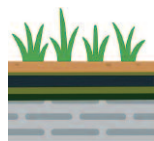
Celem artykułu jest omówienie najnowszych trendów w projektowaniu dachów zielonych, ze szczególnym uwzględnieniem innowacyjnych typologii, takich jak dachy niebieskie, brązowe i biosolarne, zaawansowanych materiałów oraz inteligentnych systemów zarządzania funkcjonowaniem tych struktur w kontekście inżynierii miejskiej XXI wieku. Artykuł stanowi próbę wskazania aktualnych trendów oraz perspektyw w obszarze inżynierii zielonych dachów w kontekście zrównoważonego budownictwa.

Klasyfikacja zielonych dachów i ich wpływ na konstrukcję budynku

Podstawą klasyfikacji zielonych dachów jest przede wszystkim grubość warstw wegetacyjnych, rodzaj roślinności, funkcjonalność oraz zakres pielęgnacji i użytkowania. Na tej podstawie wyróżnia się trzy główne typy dachów zielonych [7, 8]:

- **ekstensywne** (fotografia a), charakteryzujące się płytkimi warstwami podłoża (o grubości zazwyczaj 8 – 15 cm), roślinnością o niewielkich wymaganiach konserwacyjnych (np. rozchodniki, mchy) i dosyć małym obciążeniem konstrukcji nośnej (zwykle 0,6 – 1,8 kN/m²); systemy te mogą być zastosowane także do modernizacji istniejących budynków (mieszkalnych lub komercyjnych), w których istniejąca konstrukcja ma ograniczoną nośność;
- **półintensywne** (fotografia b), które dzięki zastosowaniu warstw podłoża o pośredniej głębokości (zwykle 15 – 25 cm) i różnorodności roślin (w tym również krzewów), zapewniają równowagę między obciążeniem (1,5 – 3,5 kN/m²), umiarkowaną konserwacją i funkcją ekologiczną;
- **intensywne** (fotografia c), wyposażone w głębokie warstwy podłoża (ponad 25 cm, a czasami sięgające nawet do 150 cm), zdolne do podtrzymywania krzewów, drzew i terenów rekreacyjnych; intensywne zielone dachy przypominają ogrody na dachach (praktycznie nie ma ograniczeń w sposobie ich użytkowania), lecz wiąże się to ze znacznym obciążeniem, które musi być uwzględnione na etapie projektu (powyżej 3,5 kN/m²).

a) extensive/
ekstensywny



Vegetation: sedums, succulents, mosses, some grasses. Maximum roof slope inclination 100% (recommended up to 70%)/Roślinność: rozchodniki; sukulenty; mchy; niektóre rodzaje traw. Maksymalne nachylenie połaci dachowej 100% (zalecane do 70%)

b) semi-intensive/
półintensywny



Vegetation: grasses, herbs, low shrubs. Maximum roof slope inclination 20%/Roślinność: trawy; zioła; niskie krzewy. Maksymalne nachylenie połaci dachowej 20%

c) intensive/
intensywny



Vegetation: perennials, ornamental grasses, shrubs, small trees. Maximum roof slope inclination 5%/Roślinność: byliny; trawy ozdobne; krzewy; małe drzewa. Maksymalne nachylenie połaci dachowej 5%

Green roofs classification

Klasyfikacja zielonych dachów

benefits, while the impact of these systems on the durability of buildings' load-bearing structures remains insufficiently recognised. Green roofs, especially intensive and hybrid roofs, generate dynamically varying loads due to seasonal changes in moisture content, biomass growth and freeze/thaw cycles, posing a risk of fatigue to structural components. These loads are characterised by irregular distribution and the occurrence of localised overloading, especially in zones with increased water retention or developed root structure. Under conditions of increased moisture and the presence of micro-organisms, accelerated degradation of steel and timber elements is observed, as well as the gradual weakening of waterproofing coatings, which can result in the penetration of organic molecules into the structural layers. Also important are the chemical reactions between the substrate components and the concrete and reinforcement, which can lead to accelerated carbonation

Wybór typu zielonego dachu nie zależy tylko od rodzaju roślinności i grubości podłoża, ale przede wszystkim od względów architektonicznych (np. kąta nachylenia połaci dachowej) i względów konstrukcyjnych (w modernizowanych budynkach istniejących nawet z uwzględnieniem wzmocnienia konstrukcji, nie zawsze będzie taka swoboda kształtowania zielonego dachu, jak np. w budynkach nowo projektowanych).

Współczesne wyzwania projektowe

W literaturze poświęconej zielonym dachom dominuje podejście koncentrujące się na korzyściach ekologicznych, energetycznych i hydrologicznych, podczas gdy wpływ tych systemów na trwałość konstrukcji nośnych budynków pozostaje niedostatecznie rozpoznany. Zielone dachy, przede wszystkim intensywne i hybrydowe, generują dynamicznie zmienne obciążenia wynikające z sezonowej zmiany wilgotności, przyrostu biomasy oraz cykli zamarzania i odmarzania, co stwarza ryzyko zmęczenia materiałowego elementów konstrukcyjnych. Obciążenia te charakteryzują się nieregularnym rozkładem i występowaniem lokalnych przeciążeń, szczególnie w strefach o zwiększonej retencji wody lub rozwiniętej strukturze korzeniowej. W warunkach zwiększonej wilgotności oraz obecności mikroorganizmów obserwuje się przyspieszoną degradację elementów stalowych i drewnianych, a także stopniowe osłabienie powłok hydroizolacyjnych, co może skutkować przenikaniem cząsteczek organicznych do warstw konstrukcyjnych. Istotne są również reakcje chemiczne pomiędzy składnikami substratów a betonem i zbrojeniem, które przy nieprawidłowym wykonawstwie mogą prowadzić do przyspieszonej karbonatyzacji i korozji stali. Tymczasem obowiązujące normy, np. [9], nie przewidują specjalnych wytycznych dotyczących specyfiki obciążeń biologicznych i hydrologicznych generowanych przez zielone dachy, co prowadzi do potencjalnych błędów w obliczeniach statycznych i dobieraniu zabezpieczeń przeciwwilgociowych. Projektanci często posługują się uproszczonymi modelami nieuwzględniającymi wpływu długookresowych zmian gęstości substratu i nieregularnych rozkładów masy w czasie eksploatacji. Postuluje się zatem konieczność rozwoju interdyscyplinarnego modelu oceny trwałości konstrukcji z uwzględnieniem monitoringu wilgotności i temperatury w przekroju warstw dachowych, zastosowania czujników np. do detekcji odkształceń oraz starzeniowych testów laboratoryjnych materiałów konstrukcyjnych typowo stosowanych w systemach dachów zielonych. Szczególnie zasadne wydaje się opracowanie nowego parametru projektowego – **współczynnika bioklimatycznej zmienności obciążenia (WBZO)**, który odzwierciedlałby sezonową zmienność masy i wilgotności pokrycia biologicznego. Dodatkowe uzasadnienie potrzeby aktualizacji podejść projektowych można znaleźć w analizie nowoczesnych realizacji zagranicznych, w których problematyka długookresowej trwałości zaczyna być coraz częściej integrowana z zaawansowanym modelowaniem strukturalnym oraz praktykami eksploatacyjnymi.

and corrosion of the steel if not carried out correctly. Meanwhile, current standards (e.g. [9]), do not provide specific guidance on the specific biological and hydrological loads generated by green roofs, leading to potential errors in static calculations and the selection of damp-proofing. Designers often use simplified models that do not take into account the impact of long-term changes in substrate density and irregular mass distributions during operation. It is therefore proposed that an interdisciplinary model for assessing the durability of structures should be developed, taking into account the monitoring of moisture and temperature in the cross-section of roof layers, the use of sensors e.g. for strain detection and laboratory ageing tests for construction materials typically used in green roof systems. In particular, the development of a new design parameter – **the bioclimatic load variation coefficient (WBZO)**, which would reflect the seasonal variation of the mass and moisture content of the biological covering, seems justified. Additional justification for the need to update design approaches can be found in the analysis of modern overseas implementations, where the issue of long-term sustainability is starting to be increasingly integrated with advanced structural modelling and operational practices.

New strategies in green roof design

Contemporary green roof engineering is evolving towards multifunctional solutions that combine ecological, hydrological and renewable energy issues [10]. One of the most interesting developments is so-called **blue roofs**, sometimes referred to as blue-green roofs, which allow not only the cultivation of plants but also the controlled storage and drainage of precipitation water [11]. By properly regulating runoff, these systems enable the efficient management of stored water, which not only reduces the load on storm sewers, but also counteracts local flooding and supports urban adaptation to climate change. An interesting example of the implementation of this type of solution is the NYC DEP programme implemented in New York City, where more than 20 000 m² of blue roofs have been constructed as part of the city's water management strategy [12]. In Poland, the first blue roof projects started to be implemented in the last decade, mainly on modern public facilities and commercial buildings. An example of such a solution is the roof of the Sfera II Shopping Gallery in Bielsko-Biała [13]. In parallel, there is also a growing interest in brown roofs, which are a clear response to the need to restore lost biodiversity in cities [14]. Unlike classical green roofs, whose vegetation is designed and introduced intentionally, **brown roofs** are based on natural ecological succession, using nutrient-limited substrates, often derived from recycled building materials (e.g. brick aggregate, gravel, concrete rubble). In Poland, brown roofs are still rare, although the first pilot implementations are emerging, e.g. on selected post-industrial sites.

Increasing demands for energy efficiency in buildings, climate protection and sustainable management of urban resources are resulting in the need to design multifunctional

Nowe strategie w kształtowaniu zielonych dachów

Współczesna inżynieria zielonych dachów ewoluuje w kierunku rozwiązań wielofunkcyjnych, które łączą zagadnienia ekologii, hydrologii i energetyki odnawialnej [10]. Jednym z ciekawych kierunków rozwoju są tzw. **dachy niebieskie** (z ang. *blue roofs*), czasami nazywane dachami niebiesko-zielonymi, które umożliwiają nie tylko uprawę roślin, ale także kontrolowane magazynowanie i odprowadzanie wody z opadów atmosferycznych [11]. Systemy te, przez odpowiednią regulację odpływu, umożliwiają efektywne zarządzanie zgromadzoną wodą, co pozwala nie tylko ograniczyć obciążenie kanalizacji burzowej, ale również przeciwdziałać lokalnym podtopieniom oraz wspierać miejską adaptację do zmian klimatu. Ciekawym przykładem wdrożenia tego typu rozwiązań jest m.in. program NYC DEP, realizowany w Nowym Jorku, w ramach którego wykonano ponad 20 000 m² dachów niebieskich jako część miejskiej strategii gospodarki wodnej [12]. W Polsce pierwsze projekty dachów niebieskich zaczęły być realizowane w ciągu ostatniej dekady, głównie na nowoczesnych obiektach użyteczności publicznej i budynkach komercyjnych. Przykładem takiego rozwiązania może być dach Galerii Handlowej Sfera II w Bielsku-Białej [13]. Jednocześnie zwiększa się również zainteresowanie **dachami brązowymi** (z ang. *brown roofs*), które stanowią jednoznaczną odpowiedź na potrzebę odtworzenia utraconej bioróżnorodności w miastach. [14]. W odróżnieniu od klasycznych dachów zielonych, których roślinność jest projektowana i wprowadzana celowo, dachy brązowe bazują na naturalnej sukcesji ekologicznej, wykorzystując podłoża o ograniczonej zawartości składników odżywczych, często pochodzące z recyklingu materiałów budowlanych (np. kruszywo ceglane, żwir, gruz betonowy). W Polsce dachy brązowe są nadal rzadkością, choć pojawiają się pierwsze pilotażowe wdrożenia, m.in. na wybranych obiektach postindustrialnych.

Coraz większe wymagania dotyczące efektywności energetycznej budynków, ochrony klimatu oraz zrównoważonego zarządzania zasobami urbanistycznymi skutkują koniecznością projektowania rozwiązań wielofunkcyjnych, łączących różne aspekty ekologiczne i technologiczne. Jednym z najbardziej obiecujących kierunków rozwoju dachów zielonych są **dachy biosolarne** – systemy łączące powierzchnie dachów wegetatywnych z instalacjami fotowoltaicznymi, które umożliwiają jednocześnie osiąganie celów środowiskowych i energetycznych. Jak pokazują badania [15], roślinność na dachu biosolarnym obniża temperaturę wokół paneli, dzięki czemu zwiększa się ich wydajność (szacuje się, że chłodne panele mogą produkować nawet do 20% energii więcej). Ciekawym przykładem dachu biosolarnego jest dach budynku logistycznego Alf Bjerckes vei 22 w Alna w Oslo w Norwegii [16]. Obiekt ten o powierzchni 160 00 m² zdobył w 2023 r. nagrodę Green Roof Award przyznaną przez Skandynawski Instytut Zielonych Dachów. Na dachu, oprócz lokalnej roślinności i paneli słonecznych, znajdują się również ule z pszczołami oraz miejsca do odpoczynku i rekreacji.

nal solutions that combine various environmental and technological aspects. One of the most promising developments for green roofs is **biosolar roofs** – systems that combine vegetated roof surfaces with photovoltaic installations to achieve environmental and energy goals simultaneously. As research [15] shows, vegetation on a biosolar roof lowers the temperature around the panels, thus increasing their efficiency (it is estimated that cooler panels can produce up to 20% more energy). An interesting example of a biosolar roof is the roof of the Alf Bjerckes vei 22 logistics building in Alna, Oslo, Norway [16]. This 16,000 square metre facility won the 2023 Green Roof Award from the Scandinavian Green Roof Institute. In addition to local vegetation and solar panels, the roof features beehives with bees and areas for rest and recreation.

The implementation of biosolar roofs requires special consideration of structural aspects, especially in terms of loading and force distribution. PV panels should be mounted on elevated substructures that allow adequate ventilation of both the vegetation and the modules themselves. It is also important to ensure access to sunlight, which requires precise spacing between rows of panels and appropriate selection of plant species that can tolerate partial shade. Modern solutions also use fixing systems without interfering with the waterproofing, based on ballast racks that distribute the load over a larger area.

Integrating greenery with renewable energy production brings benefits not only at the level of the individual building, but also at the scale of entire cities. Biosolar roofs contribute to reducing the urban heat island effect, improving air quality and increasing local biodiversity. At the same time, they enable the production of electricity without taking up additional urban space, which is particularly important in the context of limited spatial resources in urban centres. The social dimension of biosolar roofs also manifests itself in the possibility of shaping so-called green active infrastructure, increasing the resilience of cities to climate change.

There is currently an increase in research into optimising the integration of vegetation and PV modules. One of the main developments is **the creation of adaptive roofs**, equipped with environmental sensors and management systems that automatically adjust irrigation and operation levels according to weather conditions. There is also growing interest in innovative material solutions, such as lightweight substrates with increased thermal conductivity or PV elements with anti-reflective coatings adapted to urban conditions. In many European countries (e.g. Germany, Austria, Switzerland) **biosolar roofs are financially supported by local subsidy programmes**, which stimulates their development and large-scale implementation. In Poland, biosolar roofs are at an early stage of development, but there is a noticeable increase in interest on the part of local authorities and developers of ecological housing projects. EU strategies, such as the European Green Deal and the LIFE programme, promote investments that combine energy efficiency with climate change adaptation.

A comparison of the basic characteristics that distinguish classic green roofs from blue, brown and biosolar roofs is presented in table 1. In parallel with the development of biosolar roofs, advanced green roof monitoring systems have

Implementacja dachów biosolarnych wymaga szczególnie uwzględnienia aspektów konstrukcyjnych, szczególnie obciążenia i rozkładu sił. Panele PV powinny być montowane na podkonstrukcjach wyniesionych, umożliwiających odpowiednią wentylację zarówno roślinności, jak i modułów. Ważne jest również zapewnienie dostępu do światła słonecznego, co wymaga precyzyjnego rozplanowania odstępów między rzędami paneli oraz odpowiedniego doboru gatunków roślin tolerujących częściowe zacienienie. W nowoczesnych rozwiązaniach stosuje się także systemy mocujące bez ingerencji w hydroizolację, wykorzystujące balastowe stelaże rozkładające obciążenie na większej powierzchni.

Zintegrowanie zieleni z produkcją energii odnawialnej przynosi korzyści nie tylko na poziomie pojedynczego budynku, ale także w skali całych miast. Dachy biosolarne przyczyniają się do redukcji efektu miejskiej wyspy ciepła, poprawy jakości powietrza i zwiększenia lokalnej bioróżnorodności. Jednocześnie umożliwiając produkcję energii elektrycznej bez zajmowania dodatkowej powierzchni urbanistycznej, co jest szczególnie istotne w kontekście ograniczonych zasobów przestrzennych w centrach miejskich. Wymiar społeczny dachów biosolarnych przejawia się także w możliwości kształtowania tzw. zielonej infrastruktury aktywnej, zwiększającej odporność miast na zmiany klimatu.

Obecnie obserwuje się intensyfikację badań nad optymalizacją integracji roślinności i modułów PV. Jednym z głównych kierunków rozwoju jest **tworzenie dachów adaptacyjnych**, wyposażonych w czujniki środowiskowe i systemy zarządzania, które automatycznie dostosowują poziom nawodnienia i eksploatacji do warunków pogodowych. Coraz większym zainteresowaniem cieszą się również innowacyjne rozwiązania materiałowe, takie jak lekkie substraty o dużej przewodności cieplnej czy elementy PV z powłokami antyrefleksyjnymi dostosowanymi do warunków miejskich. W wielu krajach europejskich (m.in. Niemcy, Austria, Szwajcaria), **dachy biosolarne są wspierane finansowo przez lokalne programy dotacyjne**, co stymuluje ich rozwój i wdrożenie na szeroką skalę.

W Polsce dachy biosolarne znajdują się na wczesnym etapie rozwoju, ale widoczny jest wzrost zainteresowania ze strony samorządów oraz deweloperów ekologicznych inwestycji mieszkaniowych. W ramach strategii unijnych, takich jak Europejski Zielony Ład i program LIFE, promowane są inwestycje łączące efektywność energetyczną z adaptacją do zmian klimatu. Porównanie podstawowych cech wyróżniających klasyczne dachy zielone od dachów niebieskich, brązowych i biosolarnych przedstawiono w tabeli 1. Jednocześnie z rozwojem dachów biosolarnych, w ostatnich latach coraz większe znaczenie mają zaawansowane systemy monitorowania dachów zielonych [17]. Wprowadzenie tych systemów znajduje swoje uzasadnienie nie tylko w kontekście postępującej cyfryzacji budynków, ale przede wszystkim w odpowiedzi na konkretne problemy eksploatacyjne, które coraz częściej obserwuje się w praktyce inżynierskiej. Zielone dachy, przede wszystkim intensywne i o rozbudowanej strukturze warstwowej, są narażone na wiele zagrożeń związanych z niewidoczną degradacją materiałów – od lokalnego przeciążenia warstw

Table 1. Comparison of green, blue, brown and biosolar roofs

Tabela 1. Porównanie dachów zielonych, niebieskich, brązowych i biosolarnych

Characteristics/ Charakterystyka	Green roof/Dach zielony	Brown roof/Dach brązowy	Blue roof/Dach niebieski	Biosolar roof/ Dach biosolarny
Main distinctive feature/ Główna cecha wyróżniająca	aesthetics and energy efficiency improvement/estetyka i poprawa efektywności energetycznej	natural restoration of nature/naturalne odtwarzanie przyrody	rainwater management/za- rządzanie wodami opadowymi	energy production/ produkcja energii
Predominant function/ Funkcja dominująca	environmental, social and aes- thetic, plant cultivation/środowiskowa, społeczna i estetyczna, uprawa roślin	natural habitat creation/ tworzenie siedlisk naturalnych	rainwater retention and runoff control/retencja i kontrola spływu wód opadowych	energy production/ produkcja energii
Vegetations/Roślinność	specially selected (sedums, grasses, herbs)/dobierana specjalnie (rozchodniki, trawy, zioła)	natural succession of native plants/ naturalna sukcesja roślin rodzimych	optional (can be without vegetation)/opcjonalna (może być bez roślinności)	usually low, dark-loving (sedums)/zazwyczaj niska, ciemnolubna (rozchodniki)
Substrate composition/ Skład podłoża	light substrate mixture rich in components/lekka mieszanka substratowa bogata w składniki	poor substrate (recycled soil with elements of rubble, gravel, crushed bricks), organic fragments/podłoże ubogie (grunt z odzysku z elementami gruzu, żwiru, pokruszonych cegieł), fragmenty organiczne	usually no or minimal substrate layer/zwykle brak lub minimalna warstwa podłoża	ultralight substrate with high water retention/ultralekki substrat z wysoką retencją
Water retention function/ Funkcja retencji wody	medium (through drainage and substrate)/średnia (przez drenaż i substrat)	medium (irregular retention in rubble)/średnia (nieregularna retencja w gruzie)	high (designed for water storage)/wysoka (projektowany do magazynowania wody)	medium/średnia
Drainage layer/ Warstwa drenażowa	standard drainage mats / standardowe maty drenażowe	often limited or natural/często ograniczona lub naturalna	specialised systems with controlled drainage/ specjalistyczne systemy z odpływem kontrolowanym	standard drainage mats/ standardowe maty drenażowe
Retention layer/ Warstwa retencyjna	not present/nie występuje	not present/nie występuje	yes/tak	not present/nie występuje
Maintenance requirements/ Wymagania konserwacyjne	regular maintenance (irrigation, weeding)/regularna pielęgnacja (nawadnianie, odchwaszczanie)	low (after vegetation establishment stage)/niewielkie (po etapie ustanowienia roślinności)	low (mainly technical checks)/niskie (głównie kontrole techniczne)	moderate/umiarkowane
Installation cost/ Koszt instalacji	medium/średni	low to medium/mały do średniego	medium to high (requires hydraulic design)/średni do wysokiego (wymaga projektów hydraulicznych)	medium to high (cost of PV panel design and arrangements)/średni do wysokiego (koszt paneli PV projektu i uzgodnień)
Typical applications/ Typowe zastosowania	urban buildings, residential complexes/budynki miejskie, kompleksy mieszkalne	brownfield remediation/rekultywacja terenów przemysłowych	flat roofs in dense urban areas/ dachy płaskie w gęstej zabudowie miejskiej	energy efficient buildings/ budynki energooszczędne
Impact on biodiversity/ Wpływ na bioróżnorodność	High (with well-chosen vegetation)/duży (przy dobrze dobranej roślinności)	very high (natural habitat development)/bardzo duży (rozwój naturalnych siedlisk)	low (unless hybrid)/mały (chyba że w wersji hybrydowej)	high (with well-chosen vegetation)/duży (przy dobrze dobranej roślinności)
Structural load/ Obciążenie konstrukcji	medium to high/średnie do dużego	medium to high/średnie do dużego	high (water as temporary weight)/duże (woda jako ciężar tymczasowy)	high (additional weight of PV panels, racks, ballast)/duże (dodatkowo ciężar paneli PV, stelaży, balastu)
Integration with technology/ Integracja z technologią	possible (monitoring, Internet of Things)/możliwa (monitoring, Internet Rzeczy)	low/mała	high (drainage control)/duża (sterowanie odpływem)	very high (PV panels, monitoring, automation)/bardzo duża (panele PV, monitoring, automatyka)

become increasingly important in recent years [17]. The introduction of these systems is justified not only in the context of the increasing digitalisation of buildings, but above all in response to specific operational problems that are increasingly observed in engineering practice. Green roofs, especially intensive and extensively layered roofs, are subject to a range of risks associated with invisible material degradation - from localised overloading of the structural layers due to standing water, to substrate settlement and loss of drainage effectiveness, to point waterproofing leaks that are not clearly detectable by conventional methods at an early stage. Such phenomena, due to their hidden nature and low effectiveness of visual inspections, can only be effectively detected by continuous monitoring of physical parameters – such as relative humidity, temperature, local deflections or displacements. Monitoring moisture in the drainage layers, hydrostatic pressure on the membrane or local displacement

konstrukcyjnych wskutek zalegającej wody, przez osiadanie substratu i utratę efektywności odwodnienia, aż po punktowe przecieki hydroizolacji, które nie są jednoznacznie wykrywalne metodami konwencjonalnymi na wczesnym etapie. Tego typu zjawiska, ze względu na ich ukryty charakter i małą efektywność przeglądów wizualnych, mogą być skutecznie detekowane jedynie przez ciągły nadzór parametrów fizycznych, takich jak wilgotność względna, temperatura, lokalne ugięcia lub przemieszczenia. Monitorowanie wilgoci w warstwach drenażowych, ciśnienia hydrostatycznego na membranie czy przemieszczeń lokalnych umożliwi nie tylko szybką reakcję serwisową, ale też budowę modeli prognostycznych zużycia poszczególnych komponentów dachów zielonych. W tym kontekście monitoring staje się nie dodatkiem, lecz integralnym składnikiem systemu zapewniania trwałości, szczególnie istotnym w kontekście długookresowej eksploatacji. W tabeli 2 zestawiono podstawowe parametry, które mo-

not only enables a faster service response, but also the construction of predictive models for the wear and tear of individual green roof components. In this context, monitoring becomes not an add-on, but an integral component of the sustainability assurance system, particularly important in the context of long-term operation. Table 2 summarises the basic

gą podlegać monitorowaniu wraz z korzyściami, jakie to monitorowanie przynosi. Dzięki wprowadzeniu różnego typu sensorów, automatyzacji i technologii Internetu Rzeczy (IoT), realne jest jednocześnie i ciągle śledzenie warunków na dachu oraz bieżąca, aktywna optymalizacja jego funkcjonowania w czasie rzeczywistym [18].

Table 2. Green roof monitoring systems

Tabela 2. Systemy monitorowania dachów zielonych

Technology/sensor/Technologia/czujnik	Monitored parameter/Monitorowany parametr	Application/benefit/Zastosowanie/korzyść
Soil moisture sensor/ Czujnik wilgotności gleby	substrate moisture/wilgotność substratu	optimisation of irrigation, reduction of water consumption/ optymalizacja nawadniania, ograniczenie zużycia wody
Thermometer (air and substrate temperature)/ Termometr (temperatura powietrza i podłoża)	ambient and ground temperature/ temperatura otoczenia i gruntu	analysis of roof influence on microclimate and energy consumption/ analiza wpływu dachu na mikroklimat i zużycie energii
Pluviometer (rain gauge)/ Pluwiometr (deszczomierz)	rainfall quantity/ilość opadów	automatic adjustment of watering cycles/ automatyczne dostosowanie cykli podlewania
Water retention sensors/ Czujniki retencji wody	quantity of retained and run-off water/ ilość zatrzymanej i odpływającej wody	rainwater management/ zarządzanie gospodarką wodami opadowymi
Multispectral camera/NDVI/ Kamera multispektralna/NDVI	health and condition of vegetation/ zdrowie i kondycja roślinności	early detection of plant diseases and stresses/ wczesne wykrywanie chorób i stresu roślin
Load sensor/Czujnik obciążenia	weight of stored water and substrate/ masa zgromadzonej wody i substratu	building structure security/ bezpieczeństwo konstrukcji budynku
Air quality sensor (PM _{2.5} , NO ₂)/ Czujnik jakości powietrza (PM _{2.5} , NO ₂)	air pollution/zanieczyszczenie powietrza	assessment of the impact of vegetation on improving urban air quality/ ocena wpływu roślinności na poprawę jakości powietrza miejskiego
IoT management system (online platform)/ System zarządzania IoT (platforma online)	integration of data from all sensors/ integracja danych ze wszystkich sensorów	remote management, alarms, historical analyses and forecasts/ zdalne zarządzanie, alarmy, analizy historyczne i prognozy

parameters that can be monitored, together with the benefits this monitoring brings. With the introduction of various types of sensors, automation and Internet of Things (IoT) technology, it becomes feasible to simultaneously and continuously track roof conditions and actively optimise its operation in real time [18].

Advanced materials and technological innovations

The development of modern technologies as well as advanced material solutions has significantly changed the approach to the design and construction of green roofs [19]. Innovations have made these roofs lighter, more environmentally efficient, more durable and easier to maintain. Modern systems also make it possible to adapt them to extreme climatic conditions and to integrate them closely with solutions used in the smart cities of the future. Of key importance are, above all:

■ **lightweight and super-lightweight substrates** – traditional substrates consisting mainly of soil and mineral aggregates are being replaced by ultralight mixtures containing perlite, vermiculite, expanded shale, pumice, biocarbon or recycled organic materials (e.g. shredded coconut fibres). These substrates are characterised by their high water holding capacity, good air permeability and low volumetric mass, thus reducing dead loads while maintaining sufficient water and nutrient retention. This solution makes it possible to establish green roofs even on older existing buildings;

■ **modern, integrated drainage and retention systems** – polypropylene mats or biofilters drain excess rainwater, promote temporary storage, support the natural treatment of

Zaawansowane materiały i innowacje technologiczne

Rozwój nowoczesnych technologii i zaawansowanych rozwiązań materiałowych znacznie zmienił podejście do projektowania i budowy zielonych dachów [19]. Dzięki innowacjom dachy te są lżejsze, bardziej efektywne ekologicznie, trwalsze i łatwiejsze w utrzymaniu. Nowoczesne systemy umożliwiają także ich adaptację do ekstremalnych warunków klimatycznych oraz ścisłą integrację z rozwiązaniami stosowanymi w inteligentnych miastach przyszłości. Kluczowe znaczenie mają przede wszystkim:

■ **lekkie i superlekkie podłoża** – tradycyjne podłoża składające się przede wszystkim z gleby i kruszyw mineralnych, są zastępowane przez ultralekkie mieszanki zawierające perlit, wermikulit, łupkę ekspandowaną, pumeks, biowęgiel czy recyklingowane materiały organiczne (np. rozdrobnione włókna kokosowe). Substraty te cechują się dużą pojemnością wodną, dobrą przepuszczalnością powietrza oraz małą masą objętościową, dzięki czemu zmniejszają obciążenia własne przy jednoczesnym zachowaniu wystarczającej retencji wody i składników odżywczych. Rozwiązanie to umożliwia zakładanie zielonych dachów nawet na starych obiektach istniejących;

■ **nowoczesne, zintegrowane systemy drenażowo-retencyjne** – maty z polipropylenu lub biofiltry odprowadzające nadmiar wody opadowej, wspomagają jej czasowe magazynowanie oraz naturalne oczyszczanie ścieków opadowych i kontrolują tempo spływu wody opadowej do kanalizacji, natomiast kompozyty sorpcyjne oraz kapilarne systemy nawadniające umożliwiają roślinom pobieranie wody nawet w długich okresach suszy. Takie systemy sprzyjają retencji lokalnej, redukują szczytowe odpływy oraz poprawiają mikroklimat miejski;

rainwater runoff and control the rate of rainwater runoff into the sewer system. Sorption composites and capillary irrigation systems, on the other hand, enable plants to take up water even during prolonged periods of drought. Such systems promote local retention, reduce peak runoff and improve the urban microclimate;

■ **advanced waterproofing solutions** – multilayer polymer membranes and self-healing coatings increase the durability and resistance of roofing. And biodegradable membranes made from bioplastics or natural resins reduce the carbon footprint;

■ **reflective and cooling coatings** – which reflect UV radiation and thus reduce the heating of surfaces, which in turn improves the energy efficiency of buildings.

A new trend in green roof technology is prefabrication, which involves the production of prefabricated roof modules containing all the necessary layers (from waterproofing to vegetation) in a single assembly unit. Prefabricated roof systems allow for shorter construction times, increase the quality of the workmanship and facilitate the retrofitting and maintenance process. These solutions are particularly attractive in the context of large commercial buildings and in projects requiring a high standardisation of components.

The accumulated experience indicates that further development of green roof technology is heading towards the integration of its functions with water, energy and heat management systems at the scale of individual buildings and entire urban complexes. There is a growing interest in designing hybrid systems (e.g. biosolar-retention roofs) that combine adaptive, ecological and technological functions. These innovations clearly indicate that green roofs are becoming not just an aesthetic or ecological element, but a fully-fledged component of the technical infrastructure of cities of the future.

Summary

Green roofs, one of the key elements of modern green infrastructure, have evolved from simple horticultural solutions to highly specialised engineering systems capable of performing complex environmental, energy and utility functions. Their use in urban architecture contributes to mitigating climate change, improving water balance, increasing the energy efficiency of buildings and restoring natural habitats in highly urbanised environments.

Modern green roof design strategies should be based on three key pillars:

1) **differentiating functions and typologies**, taking into account specific urban and climatic needs (e.g. blue, brown, biosolar roofs);

2) **implementation of innovative materials and technologies**, including ultralight substrates, retention-capillary systems, self-healing coatings and prefabricated roof modules;

3) **integration with a digital management system**, using sensors, automation and predictive algorithms to optimise the performance of roofs under varying environmental conditions.

■ **zaawansowane rozwiązania hydroizolacyjne** – wielowarstwowe membrany polimerowe i samonaprawiające się powłoki zwiększające trwałość i odporność pokryć dachowych, natomiast biodegradowalne membrany wykonane z bioplastików lub naturalnych żywic pozwalają na zmniejszenie śladu węglowego;

■ **powłoki refleksyjne i chłodzące** – odbijające promieniowanie UV i w ten sposób ograniczają nagrzewanie się powierzchni, co z kolei poprawia wydajność energetyczną budynków;

Nowym trendem w technologii dachów zielonych jest prefabrykacja, polegająca na produkcji gotowych modułów dachowych, zawierających wszystkie niezbędne warstwy (od hydroizolacji po roślinność) w jednej jednostce montażowej. Prefabrykowane systemy dachowe pozwalają na skrócenie czasu realizacji inwestycji, poprawiają jakość wykonania oraz ułatwiają proces modernizacji i konserwacji. Rozwiązania te są szczególnie atrakcyjne w przypadku dużych obiektów komercyjnych oraz w projektach wymagających wysokiej standaryzacji komponentów.

Zgromadzone doświadczenia wskazują, że dalszy rozwój technologii dachów zielonych zmierza w kierunku integracji ich funkcji z systemami gospodarowania wodą, energią i ciepłem w skali pojedynczego budynku oraz całych zespołów urbanistycznych. Obserwuje się wzrost zainteresowania projektowaniem systemów hybrydowych (np. dachów biosolarno-retencyjnych), które łączą funkcje adaptacyjne, ekologiczne i technologiczne. Wspomniane innowacje wskazują jednoznacznie, że dachy zielone stają się nie tylko elementem estetycznym lub ekologicznym, ale pełnoprawnym komponentem infrastruktury technicznej miast przyszłości.

Podsumowanie

Zielone dachy, będące jednym z kluczowych elementów współczesnej zielonej infrastruktury, ewoluowały od prostych rozwiązań ogrodniczych do wyspecjalizowanych systemów inżynierskich, zdolnych do realizacji złożonych funkcji środowiskowych, energetycznych i użytkowych. Ich zastosowanie w architekturze miejskiej przyczynia się do łagodzenia skutków zmian klimatycznych, poprawy bilansu wodnego, zwiększenia efektywności energetycznej budynków oraz odtworzenia siedlisk przyrodniczych w środowisku silnie zurbanizowanym.

Nowoczesne strategie projektowe zielonych dachów powinny bazować na trzech kluczowych filarach:

1) **różnicowaniu funkcji i typologii**, uwzględniającym specyficzne potrzeby urbanistyczne i klimatyczne (np. dachy niebieskie, brązowe, biosolarne);

2) **wdrażaniu innowacyjnych materiałów i technologii**, w tym ultralekkich substratów, systemów retencyjno-kapilarnych, powłok samonaprawiających się oraz prefabrykowanych modułów dachowych;

3) **integracji z cyfrowym systemem zarządzania**, wykorzystującym czujniki, automatykę i algorytmy predykcyjne w celu optymalizacji działania dachów w zmiennych warunkach środowiskowych.

Zastosowanie zintegrowanej metody projektowej, uwzględniającej analizę konstrukcyjną, klimatyczną i biologiczną, pozwala na znaczne zwiększenie efektywności oraz trwałości sys-

The use of an integrated design methodology, incorporating structural, climatic and biological analysis, allows for a significant increase in the efficiency and sustainability of roof systems. The use of digital design tools (e.g. BIM or LCA) and IoT platforms supports the accurate modelling of green roof behaviour over the life cycle of a building and improves the interoperability of solutions with other smart building components.

It was concluded that green roofs should be designed contextually, based on local environmental, structural and social data, with a focus on maximising environmental and economic benefits. It is recommended that they should be considered as integrated elements of urban infrastructure, capable of working with water, sewerage, energy and communication systems and networks. The promotion of hybrid roofs (e.g. biosolar roofs) can be an effective strategy to achieve climate and energy goals in new construction and retrofits. It seems that the standardisation of prefabricated roof solutions and the development of modularity should significantly accelerate the rate of implementation of green roofs on an urban scale.

Green roofs, if designed in a systemic and interdisciplinary manner, can play a key role in the transformation of the urbanised environment towards resilience, self-sufficiency and a high quality of life for residents. Their further development, however, requires close collaboration between science, public administration and the building sector.

This paper is part of the implementation of project number 2022-1-PL01-KA220-HED-000086828 GREEN ROOFS Technician Training Programme. Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.

Received: 12.02.2025
Revised: 16.04.2025
Published: 23.07.2025

temów dachowych. Wykorzystanie cyfrowych narzędzi projektowych (np. BIM lub LCA) i platform IoT wspiera precyzyjne modelowanie zachowań dachów zielonych w cyklu życia obiektu oraz poprawia interoperacyjność rozwiązań z innymi komponentami inteligentnych budynków. Stwierdzono, że zielone dachy powinny być projektowane kontekstowo, z uwzględnieniem lokalnych danych środowiskowych, konstrukcyjnych i społecznych, z naciskiem na maksymalizację korzyści ekologicznych i ekonomicznych. Zaleca się, aby były one traktowane jako zintegrowane elementy infrastruktury miejskiej, zdolne do współpracy z instalacjami i sieciami wodnymi, kanalizacyjnymi, energetycznymi i komunikacyjnymi.

Promowanie dachów hybrydowych (np. biosolarnych) może stanowić efektywną strategię osiągania celów klimatyczno-energetycznych w nowym budownictwie oraz w obiektach modernizowanych. Wydaje się, że standaryzacja prefabrykowanych rozwiązań dachowych i rozwój modularności powinny znacznie przyspieszyć tempo wdrażania zielonych dachów w skali miejskiej. Zielone dachy, jeśli będą projektowane w sposób systemowy i interdyscyplinarny, mogą odegrać kluczową rolę w transformacji środowiska zurbanizowanego w kierunku odporności, samowystarczalności i bardzo dobrej jakości życia mieszkańców. Ich dalszy rozwój wymaga jednak ścisłej współpracy nauki, administracji publicznej i sektora budowlanego.

Artykuł jest częścią projektu o numerze 2022-1-PL01-KA220-HED-000086828 GREEN ROOFS Technician Training Program, sfinansowanego ze środków UE. Wyrażone poglądy i opinie są jedynie opiniami autora i niekoniecznie odzwierciedlają poglądy i opinie Unii Europejskiej lub Europejskiej Agencji Wykonawczej ds. Edukacji i Kultury (EACEA). Unia Europejska ani EACEA nie ponoszą za nie odpowiedzialności.

Artykuł wpłynął do redakcji: 12.02.2025 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 16.04.2025 r.
Opublikowano: 23.07.2025 r.

Literature

- [1] Thokchom S, Shijagurumayum C, Suresh T. Green Roofs – A Review. *Journal of Physical Sciences, Engineering and Technology*. 2022; DOI: 10.18090/samridhi.v14spl01.6.
- [2] Praca zbiorowa pod redakcją Palha P. Green Roofs Technical Guide. Technical guide for design, construction and maintenance of green roofs. ANCV – Associação Nacional de Coberturas Verdes, 1st Edition. Porto; 2024.
- [3] Dawczyński S. Function of green roofs in sustainable environment, fib Symposium: ReConStruct Resilient Concrete Structures, Christchurch, New Zealand, 2024.
- [4] Rowe DB. Green roofs as a means of pollution abatement, *Environmental Pollution*. 2011; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.10.029>.
- [5] Pirouz B, Palermo SA, Becciu G, Sanfilippo U, Nejad HJ, Piro P, Turco MA. Novel Multipurpose Self-Irrigated Green Roof with Innovative Drainage Layer. *Hydrology*. 2023. DOI: 10.3390/hydrology10030057.
- [6] Vourdoubas J. Review of the Benefits of Green Roofs. *International Journal of Current Science Research and Review*. 2024. DOI: 10.47191/ijcsrr/v7-i9-48.
- [7] Dachbegrünungsrichtlinien – Richtlinien für die Planung, Bau und Instandhaltung von Dachbegrünungen, Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau. V, FLL; 2018.
- [8] Dawczyński S. Rozwiązania zielonych dachów w zrównoważonych przestrzeniach miejskich. W: Werle S., Ferdyn-Grygierek J., editors. *Ochrona klimatu i środowiska, nowoczesna energetyka: wybrana problematyka*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. 2024. DOI: 10.34918/88720.
- [9] PN-EN 1991-1-1 Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-1: Oddziaływania ogólne. Ciężar objętościowy, ciężar własny, obciążenia użytkowe w budynkach.
- [10] Knut P, Kocurkova M, Petkanic S. Survey of biosolarroofs in the world. *E3S Web of Conf*. 2024. DOI: 10.1051/e3sconf/202455001005.

- [11] Richter M, Dickhaut W. Long-Term Performance of Blue-Green Roof Systems – Results of a Building-Scale Monitoring Study in Hamburg, Germany. *Water*. 2023; <https://doi.org/10.3390/w15152806>.
- [12] NYC Green Infrastructure Plan: 2012 Green Infrastructure Pilot Monitoring Report <https://www.nyc.gov/assets/dep/downloads/pdf/water/stormwater/green-infrastructure/2012-green-infrastructure-pilot-monitoring-report.pdf>. Data dostępu: 02/04/2025 r.
- [13] Francke B, Vaverkova MD. Trwałość warstw hydroizolacyjnych stosowanych w przekryciach dachów zielonych w świetle aktualnych specyfikacji technicznych oraz na przykładzie Galerii Handlowej „Sfera II” w Bielsku-Białej. *Przegląd Budowlany*. 2023. DOI: 10.5604/01.3001.0054.1326.
- [14] <https://www.icbprojects.co.uk/solutions/green-roof-systems/brown-roof-systems>. Data dostępu: 02/04/2025 r.
- [15] Bio-solar green roofs increase solar energy output: The sunny side of integrating sustainable technologies. *Building and Environment*. 2022. DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109703.
- [16] A logistics building of distinction – Alf Bjerckesvei 22 wins the Green Roof Award 2023 <https://nordicarch.com/stories/alf-bjerckes-vei-22-green-roof-award-2023>. Data dostępu: 15/05/2025 r.
- [17] Gaffin SR, Khanbilvardi R, Rosenzweig C. Development of a Green Roof Environmental Monitoring and Meteorological Network in New York City. *Sensors*. 2009; <https://doi.org/10.3390/s90402647>.
- [18] Starry O, Lea-Cox J, Ristvey A, Cohan S. Monitoring and modeling green roof performance using sensor networks. *Acta Hort.* 1037, 663-669, DOI: 10.17660/ActaHortic.2014.1037.85.
- [19] Cascone S. Green Roof Design: State of the Art on Technology and Materials. *Sustainability*. 2019; <https://doi.org/10.3390/su11113020>.