

Geometria i natura. Zastosowanie kopuł geodezyjnych dla mobilnych obiektów rekreacyjnych – modelowanie i prototypowanie

Geometry and nature. The use of geodesic domes for mobile recreational facilities – modeling and prototyping

Streszczenie

Architektura mobilna stanowi alternatywną próbę kształtowania środowiska mieszkaniowego. Lekkie struktury przenośne mogą pełnić rolę przestrzeni integracyjnej łącząc naturę, architekturę i użytkownika. Panelowe kopuły geodezyjne w typologii wolnostojącej lub łączone w zespoły, stanowią istotny wkład w badania architektoniczne obiektów o funkcji mieszkaniowej, w tym również rekreacyjnej. Przestrzeń przeznaczona do integracji, w którą wpisują się funkcje rekreacyjne, może stanowić istotny element kształtowania stref zurbanizowanych, w tym współczesnych osiedli mieszkaniowych. Celem badań przedstawionych w artykule są aspekty geometryczne i ergonomiczne opracowanych modeli badawczych. Pod względem funkcjonalnym, panelowe geodezyjne struktury kopułowe zostały przedstawione typologicznie jako obiekty wolnostojące o układzie zbliżonym do jednostek mieszkaniowych na planie centralnym. Badania zostały prowadzone w oparciu o stworzenie autorskiego systemu wskaźników efektywności geometrycznej z zastosowaniem metody komparatywnej i opracowania sześciu wskaźników efektywności w zakresie objętości, minimalizacji powierzchni, ilości połączeń oraz grubości zastosowanych paneli warstwowych.

Abstract

The geometry of organic forms shows that nature is an expert in the field of form, architecture, art, and construction. The analysis of forms found in nature allowed architects, engineers, and mathematicians to transfer the language of nature into engineering and architectural structures. The article presents solutions for geodesic domes made of an innovative system of self-supporting structural and architectural panels for the ReSa mobile recreational facility, which is the subject of research work by a team of scientists from the Faculty of Architecture of the Wrocław University of Science and Technology. Furthermore, an analysis of geodesic domes based on the construction of self-supporting sandwich panels was presented in correlation with the geometric heritage of Richard B. Fuller and contemporary trends in the construction of lightweight portable structures with a recreational function. The functional systems of geodesic panel shells were reviewed and the research was based on the creation of an original system of geometric efficiency indicators using the comparative method.

Słowa kluczowe: kopuły geodezyjne w środowisku mieszkaniowym, mobilne obiekty rekreacyjne, architektura mobilna, architektura przenośna
Keywords: geodesic domes, mobile recreational facilities, mobile architecture, portable architecture

*Jakub Onyszkiewicz, dr inż. arch., Wydział Architektury, Politechnika Wrocławska / Jakub Onyszkiewicz, Dr. Eng. Arch., Faculty of Architecture, Wrocław University of Science and Technology, <https://orcid.org/0000-0002-7640-1850>, mail: jakub.onyszkiewicz@pwr.edu.pl

**Kajetan Sadowski, dr inż. arch., Wydział Architektury, Politechnika Wrocławska / Kajetan Sadowski, Dr. Eng. Arch., Faculty of Architecture, Wrocław University of Science and Technology, <https://orcid.org/0000-0002-1713-430X>, mail: kajetan.sadowski@pwr.edu.pl

***Anna Berbesz, dr inż. arch., Wydział Architektury, Politechnika Wrocławska / Anna Berbesz, Dr. Eng. Arch., Faculty of Architecture, Wrocław University of Science and Technology, <https://orcid.org/0000-0002-3887-6329>, mail: anna.berbesz@pwr.edu.pl

1. Wstęp

Geometria jest nieodłączną częścią natury. Matematyczne bogactwo form organicznych pokazuje, że to natura jest ekspertem w dziedzinie formy, architektury, sztuki i konstrukcji. Natura dąży do optymalizacji kształtu, minimalizacji energii, materii i powierzchni. Stąd w środowisku organicznym wiele form optymalizuje geometrię do kształtu kuli lub spirali. Formy kuliste, w przeciwieństwie do kubicznych, zapewniają maksymalną objętość wewnętrzną przy minimalizacji powierzchni zewnętrznej (Barwicka, 2010). Analiza form występujących w naturze pozwoliła architektom, inżynierom i matematykom przenieść język przyrody na struktury inżynierskie i architektoniczne. Do innowatorów odkrywających prawa natury w swoich dziełach można zaliczyć Benoît Mandelbrota (twórcę pojęcia fraktali w latach 70. XX w.) (Samuel, 2012) czy Richarda Buckminstera Fullera (innowatora, architekta i propagatora kopuł geodezyjnych). R.B. Fuller był twórcą wielowymiarowym, wizjonerem żyjącym na przełomie stuleci, w momencie, gdy rozpoczął się na szeroką skalę rozwój technologiczny jako konsekwencja rewolucji przemysłowej. W *Operating Manual for Spaceship Earth*, przekonywał, że statek kosmiczny Ziemia, na którym się wszyscy znajdujemy, stanowi integralną maszynę, a nadmierna konsumpcja jej zasobów naturalnych może doprowadzić do jej całkowitej destrukcji (Fuller, 1969). Michela Rossi zwraca uwagę, że właśnie dzięki pracy R.B. Fullera historia projektowania opartego na formach organicznych została skierowana w stronę efektywności budynków (Rossi, 2012). A nawet ich efemeryczności tzn. minimalizowania zużycia zasobów do ich budowy oraz funkcjonowania (Sadowski, 2020). Fuller przyjął je jako model inżynierski i znalazł w symetrii wielościanu statyczną odpowiedź na równowagę strukturalną kopuł geodezyjnych. Opracował organiczne rozwiązania dla architektury mobilnej takie jak samonośne struktury typu *tensegrity*, później rozwijane w konstrukcji kopuł geodezyjnych opartych na równowadze sił. W kształtowaniu konstrukcji kopuł geodezyjnych został przetransponowany zrównoważony układ wektorów występujących w naturze na powierzchni komórek kulistych. Architektura mobilna stanowi alternatywną próbę kształtowania środowiska mieszkaniowego. Lekkie struktury przenośne o funkcji rekreacyjnej mogą pełnić rolę przestrzeni integracji łącząc naturę, architekturę i użytkownika (Berbesz, 2019).

Struktury stanowiące pierwowzór współcześnie rozumianych kopuł geodezyjnych funkcjonowały już od początku kształtowania siedzib ludzkich, a połączenie pomiędzy ich formą, a światem natury zostało wieloaspektowo i wielokrotnie potwierdzone (Morgan, 2003). Sięgając do etymologii obiektów para-architektonicznych, struktury quasi-kopułowe są przykładem jednych z pierwszych obiektów mieszkalnych w historii człowieka. W strukturach siedzib ludów nomadycznych, które przetrwały do dzisiaj w swojej degeneratywnej formie, widoczne są liczne rozwiązania szkieletowe, w tym w układzie quasi-kopułowym, które ze względu na swoją lekką konstrukcję i pokrycie materiałowe, mogą być przenoszone z miejsca na miejsce w zależności od potrzeb użytkowników. Analizując historię architektury, można zauważyć, że architekci i projektanci wielokrotnie

1. Introduction

Geometry is an inherent part of nature. The geometry of organic forms shows that nature is an expert in the fields of form, architecture, art, and construction. Nature strives to optimize shape, minimize energy, matter and surface area. Hence, in an organic environment, many forms optimize their geometry to a sphere or spiral. Spherical forms, unlike cubic ones, provide maximum internal volume while minimizing external surface area (Barwicka, 2010). The analysis of forms found in nature allowed architects, engineers and mathematicians to transfer the language of nature into engineering and architectural structures. Innovators discovering the laws of nature in their works include Benoît Mandelbrot (creator of the concept of fractals in the 1970s) (Samuel, 2012) and Richard Buckminster Fuller – innovator, architect and promoter of geodesic domes. R.B. Fuller was a multidimensional creator, a visionary living at the turn of the century, when large-scale technological development began as a consequence of the industrial revolution. In the *Operating Manual for Spaceship Earth*, he argued that Spaceship Earth, on which we all find ourselves, is an integral machine, and excessive consumption of its natural resources can lead to its complete destruction (Fuller, 1969). Michela Rossi points out that it was thanks to the work of R.B. Fuller that the history of design based on organic forms was directed towards the efficiency of buildings (Rossi, 2012). And even their ephemerality, i.e. minimizing the use of resources for construction and operation (Sadowski, 2020). Fuller adopted them as an engineering model and found in the symmetry of the polyhedron a static answer to the structural balance of geodesic domes. He developed organic solutions for mobile architecture, such as self-supporting tensegrity structures, which later developed into the construction of geodesic domes based on the balance of forces. When shaping the construction of geodesic domes, a balanced system of vectors occurring in nature was transposed on the surface of spherical cells.

The structures constituting the prototype of the contemporary geodesic domes have existed since the beginning of the development of human habitations, and the connection between their form and the world of nature has been confirmed in many aspects and many times (Morgan, 2003). Referring to the etymology of para-architectural objects, quasi-dome structures are an example of some of the first residential structures in human history. The structures of the residences of nomadic peoples, which have survived to this day in their degenerative form, feature numerous skeletal solutions, including a quasi-dome system, which, due to their light structure and material covering, can be moved from place to place depending on user needs. Analyzing the history of architecture, it can be noticed that architects and designers have repeatedly referred to solutions on a central plan with a circular cross-section, especially in the case of buildings

nawiązywali do rozwiązań na planie centralnym o przekroju kołowym, szczególnie w przypadku obiektów o funkcji mieszkaniowej lub sakralnej. Rzuty w układzie centralnym są z perspektywy architektonicznej rozwiązaniami totalnymi o bardzo determinującym układzie wnętrza, stawiane najczęściej w układzie wolnostojącym.

Artykuł stanowi analizę rozwiązań kopuł geodezyjnych wykonanych z innowacyjnego systemu samonośnych paneli konstrukcyjno-architektonicznych dla mobilnego obiektu rekreacyjnego ReSa, który stanowi temat prac badawczych zespołu naukowców z Wydziału Architektury Politechniki Wrocławskiej. Ponadto, artykuł zawiera analizę kopuł geodezyjnych w oparciu o konstrukcję samonośnych paneli warstwowych w korelacji do dziedzictwa geometrycznego Richarda B. Fullera i współczesnych trendów w kształtowaniu lekkich struktur przonośnych o funkcji rekreacyjnej.

2. Istniejące rozwiązania funkcjonalne i konstrukcyjne

Współcześnie powstają na coraz większą skalę obiekty mobilne o niewielkiej kubaturze i lekkiej konstrukcji, które mogą być przemieszczane za pomocą własnego napędu lub zewnętrznych środków transportu w środowisku lądowym i wodnym. Pod względem funkcjonalnym

Il.1. Mobilna struktura o funkcji rekreacyjnej Hypercubus, proj. WG3.
Źródło: <https://www.wg3.at/projekt/hypercubus/>, (data dostępu: 22.08.2023)

Il. 1. Mobile structure with a recreational function Hypercubus, designed by WG3. Source: <https://www.wg3.at/projekt/hypercubus/> (accessed: 22.08.2023)



with a residential or sacred function. From an architectural perspective, central plans are total solutions with a very determining interior layout, most often placed in a free-standing (detached) arrangement.

The article is an analysis of geodesic dome solutions made of an innovative system of self-supporting structural and architectural panels for the ReSa mobile recreational facility, which is the subject of research work by a team of scientists from the Faculty of Architecture of the Wrocław University of Science and Technology. Moreover, the article contains an analysis of geodesic domes based on the construction of self-supporting sandwich panels in correlation with the geometric heritage of Richard B. Fuller and contemporary trends in shaping lightweight portable structures with a recreational function.

2. Contemporary functional and structural solutions

Nowadays, mobile objects with small volume and light structure are being created on an increasing scale, which can be moved using their own drive or external means of transport in land and water environments. In terms of functionality, these are residential, service, hybrid, and recreational units, consistent with the latest trends in the development of the tourism industry. Experimental designs that are created to pave the way for new forms of design are an accepted and integral part of many industries in the research and development sector, especially where innovation is key to maintaining a competitive advantage. This applies, among others, to: aviation, automotive and information technology industries. Experimental buildings are most often created incidentally for the needs of specialized construction or trade exhibitions (Kronenburg, 2008). One of the contemporary examples of an experimental mobile structure with a recreational function is Hypercubus, designed by the WG3 group [Il. 1]. The project is a reinterpretation of the traditionally understood tourist apartment. The concept is a combination of the aspect of mobility and the philosophy of nomadism with material and functional experiment. A structure with a recreational function can be moved from place to place using external means of transport. In addition, units can function as solitaires located at a distance from each other or as housing estates¹. The development of the prototype of the Hypercubus structure was a continuation of the idea of "minimal housing construction" as part of the assumptions of the one2one project - minimal space, minimal material led by prof. Peter Schreibmayer at TU in Graz (Schreibmayer, 2009). The structure of the facility consists of multi-layer boards made of cross-pressed wood using CLT (Cross-Laminated Timber)² technology. The outer covering layer is provided by a waterproof foil mounted directly on the wooden structure.

In the market and in the sector of architectural and construction projects, geodesic domes with a recreational function and a frame structure are appearing on an increasing scale in sets prepared for

są to jednostki mieszkalne, usługowe, hybrydowe, jak również rekreacyjne, wpisujące się w najnowsze kierunki rozwoju branży turystycznej. Projekty eksperymentalne, które tworzone są w celu ukształtowania drogi dla nowych form projektowania są akceptowaną i integralną częścią wielu gałęzi przemysłu w sektorze badań i rozwoju, szczególnie tam, gdzie innowacja jest kluczem do utrzymania przewagi konkurencyjnej. Dotyczy to m.in. przemysłu lotniczego, samochodowego czy technologii informacyjnej. Budynki eksperymentalne są tworzone najczęściej incydentalnie na potrzeby specjalistycznych wystaw budowlanych czy handlowych (Kronenburg, 2008). Jednym ze współczesnych przykładów eksperymentalnej mobilnej struktury o funkcji rekreacyjnej jest *Hypercubus*, projektu grupy WG3 [Il. 1]. Projekt stanowi reinterpretację tradycyjnie rozumianego apartamentu turystycznego. Koncept jest połączeniem aspektu mobilności i filozofii neomadyzmu z eksperymentem materiałowym i funkcjonalnym. Struktura o funkcji rekreacyjnej może być przenoszona z miejsca na miejsce za pomocą zewnętrznych środków transportu. Dodatkowo jednostki mogą funkcjonować jako solitery zlokalizowane w oddaleniu od siebie lub jako osiedla obiektów¹. Kształtowanie prototypu struktury *Hypercubus* stanowiło kontynuację idei „minimalnego budownictwa mieszkaniowego” w ramach założeń projektu *one2one – minimalna przestrzeń, minimalny materiał* prowadzonego przez prof. Petera Schreibmayera w TU w Graz (Schreibmayer, 2009). Konstrukcję obiektu stanowią wielowarstwowe płyty z drewna prasowanego krzyżowo w technologii CLT (ang. *Cross-Laminated Timber*)². Zewnętrzna warstwa pokryciową zapewnia folia przeciwwodna mocowana bezpośrednio na drewnianej konstrukcji.

Na rynku i w sektorze projektów architektoniczno-budowlanych pojawiają się na coraz większą skalę kopuły geodezyjne pełniące funkcję rekreacyjną o konstrukcji szkieletowej w zestawach przygotowanych do samodzielnego montażu oraz projekty do realizacji z materiałów własnych. Alternatywą dla szkieletowych konstrukcji namiotowych są rozwiązania, w których szkielet (najczęściej drewniany) wypełniony jest materiałem izolacyjnym lub stanowi podkonstrukcję (lub szalunek) pod warstwę ocieplenia [Il. 2]. Zwiększa się wówczas izolacyjność cieplna przegród, co jednak ma wpływ na czas i sposób montażu tego typu kopuły. Zastosowanie jako warstwy zewnętrznej, np. naturalnych tynków glinianych wymaga wysokiego reżimu utrzymania ich wilgotności, a ich wykonanie bez dodatkowego zabezpieczenia możliwe jest tylko w umiarkowanej temperaturze i przy braku opadów. Nośność ogniowa konstrukcji z ramą drewnianą i wypełnieniem wykonanym w technologii bali słomy wymaga każdorazowo potwierdzenia zgodności z lokalnymi przepisami bezpieczeństwa pożarowego obiektów architektonicznych.

3. Struktury panelowe – rozwiązania patentowe i badania współczesne

Koncepcja struktury powłokowej w układzie kopuły geodezyjnej pojawiła się już w patencie US2905113A: *Self-Strutted Polydome* własności B. Fullera z 1957 r., gdzie zostały zamieszczone wytyczne montażu paneli



Il.2. Kopuła wykonywana w technologii Straw Bale - drewniany szkielet na bazie dwudziestościanu foremnego w trakcie montażu izolacji z kostek słomy. Źródło: <http://www.domerama.com/types-of-domes/straw-bale-dome/>, (data dostępu: 22.08.2023)

Ill. 2. The dome is made using Straw Bale technology – a wooden frame based on a regular icosahedron during the installation of insulation made of straw cubes. Source: <http://www.domerama.com/types-of-domes/straw-bale-dome/> (accessed: 22.08.2023)

self-assembly, as well as projects to be implemented using your own materials. An alternative to tent frame structures is solutions in which the frame (usually wooden) is filled with insulating material or constitutes a substructure (or formwork) for the insulation layer [Il. 2]. This increases the thermal insulation of the partitions, which, however, affects the time and method of installation of this type of domes. The use of natural clay plasters as an external layer requires a high level of humidity maintenance, and their application without additional protection is only possible at moderate temperatures and in the absence of precipitation. The fire load-bearing capacity of a structure with a wooden frame and straw bale filling requires each time confirmation of compliance with local fire safety regulations for architectural structures.

3. Panel structures – patent solutions and contemporary research

The concept of a shell structure in a geodesic dome system already appeared in the patent US2905113A: *Self-Strutted Polydome* owned by B. Fuller from 1957. where guidelines for the installation of small-sized steel panels within a geodesic dome are provided so that the force flows for the selected type of dome are maintained³. Panel shells used in geodesic domes were also analyzed by David S. Geiger, as evidenced by the patent US7434359B2: *Constructing geodesic dome with panels*, obtained in 2008⁴. D. Geiger analyzed the possibilities of creating self-supporting panels connected at the contact points using a system of connectors. The patent application concerns the possibility of using various materials as panel components, from wood, plastic, fiberglass or resin. W. Gythiel et al. confirmed in his

stalowych niewielkiej wielkości w ramach kopuły geodezyjnej tak, aby strumienie sił dla wybranego typu kopuły zostały zachowane³. Powłoki panelowe stosowane w kopułach geodezyjnych analizował również David S. Geiger, o czym świadczy patent US7434359B2: *Constructing geodesic dome with panels*, uzyskany w 2008 r.⁴ D. Geiger analizował możliwości stworzenia paneli samonośnych łączonych w punktach styku za pomocą systemu łączników. Zgłoszenie patentowe dotyczy możliwości zastosowania zróżnicowanych materiałów jako elementów składowych paneli, od drewna, tworzywa sztucznego, włókna szklanego lub żywicy. W. Gythiel potwierdził w swoich badaniach, że kopuła geodezyjna Richarda Buckminstera Fullera (patent US2682235A) będzie charakteryzowała się bardziej równomiernym naprężeniem poszczególnych elementów niż jest to możliwe w przypadku jakiegokolwiek konstrukcji dotychczas znanej (Gythiel et al., 2020). Kopuła geodezyjna jako w pełni naprężona może zostać skonstruowana nie tylko jako struktura prętowa, ale również wykonana z paneli warstwowych samonośnych jak zostało udowodnione przez zespół badawczy pod kierunkiem prof. Waldemara Bobera (Bober, Stobiecki, 2022). Badania teoretyczne związane z zastosowaniem kopuł w konstrukcji innej niż prętowa prowadzi również dr inż. arch. Przemysław Stobiecki. W artykule *Pierścieniowe kopuły stereograficzne* przedstawia obliczenia statyczne wraz z wirtualnym modelem konstrukcji kopuły w postaci pierścieni uporządkowanych poprzez zrzutowanie ich obwodu na powierzchnię kuli (Stobiecki, 2020).

Jednym z rozwiązań bazujących na realnym współczesnym zastosowaniu samonośnych paneli warstwowych w konstrukcjach kopuł geodezyjnych było opracowanie przez zespół naukowców z Wydziału Architektury Politechniki Wrocławskiej (prof. B. Gronostajska, prof. W. Bober, dr J. Onyszkiewicz, dr K. Sadowski, dr P. Stobiecki, dr A. Berbesz, dr R. Czajka) innowacyjnego systemu paneli konstrukcyjno-architektonicznych dla mobilnego obiektu rekreacyjnego ReSa w latach 2020-2023. Słowo ReSa jest akronimem słów „rekreacyjna struktura” i odnosi się bezpośrednio do czasowego wykorzystania projektowanej jednostki mobilnej na terenach turystycznych. Założeniem projektu było opracowanie autorskiej, eksperymentalnej metody projektowania struktur mobilnych z zastosowaniem warstwowych elementów panelowych z pokryciem z płyt prasowanych z betonu GRC w układzie kopuły geodezyjnej. Innowacyjność rozwiązania związana jest ze sposobem kształtowania paneli w kontekście fizyki budowli oraz ich połączeń. Opracowanie jednostki mobilnej oparte było na kluczowych nowościach rezultatu projektu: ochronie środowiska poprzez zmniejszenie emisji CO₂, oszczędności energii potrzebnej do ogrzewania budynku z uwagi na straty przez przenikanie ciepła przez przegrody, uzyskaniu wysokiej szczelności obiektu n₅₀ [1/h] oraz zmniejszenie parametru zwartości bryły (Z). Liderem projektu jest firma specjalizująca się w produkcji paneli elewacyjnych, okładzin zewnętrznych i wewnętrznych oraz mebli z zastosowaniem betonu architektonicznego, w tym betonu GRC (GRFC).

Współpraca nad prototypem była prowadzona wraz z zespołem badawczym z Politechniki Wrocławskiej

research that Richard Buckminster Fuller's geodesic dome (patent US2682235A) will be characterized by a more uniform tension of individual elements than is possible in the case of any structure previously known (Gythiel et al., 2020). A fully tensioned geodesic dome can be constructed not only as a bar structure, but also made of self-supporting sandwich panels, as was proven by the research team led by prof. Waldemar Bober (Bober, Stobiecki, 2022). Theoretical research related to the use of domes in structures other than bar structures is also conducted by dr. Przemysław Stobiecki. The article *Annular stereographic domes* presents static calculations along with a virtual model of the dome structure in the form of rings ordered by projecting their circumference onto the surface of a sphere (Stobiecki, 2020). One of the solutions based on the real, modern use of self-supporting sandwich panels in the construction of geodesic domes was developed by a team of scientists (prof. B. Gronostajska, prof. W. Bober, dr. J. Onyszkiewicz, dr. K. Sadowski, dr. P. Stobiecki, dr. A. Berbesz, dr. R. Czajka) from the Faculty of Architecture of the Wrocław University of Science and Technology, an innovative system of construction and architectural panels for the ReSa mobile recreational facility in 2020-2023. The word ReSa is an acronym for the words "recreational structure" and refers directly to the temporary use of the designed mobile unit in tourist areas. The aim of the project was to develop an original experimental method for designing mobile structures using layered panel elements covered with pressed GRC panels in a geodesic dome arrangement. The innovativeness of the solution is related to the way the panels are shaped in the context of building physics and their connections. The development of the mobile unit was based on the key novelties of the project result: environmental protection by reducing CO₂ emissions, saving energy needed to heat the building due to losses due to heat transfer through partitions, achieving a high tightness of the facility n₅₀ [1/h] and reducing the solid compactness parameter (Z). The project leader is a company specializing in the production of facade panels, external and internal cladding, and furniture using architectural concrete, including GRC concrete (GRFC). The collaboration on the prototype was carried out together with a research team from Wrocław University of Science and Technology in the field of construction, architectural, and energy saving solutions. The GRC or GRFC (Glass Fiber Reinforced Concrete) technology used is a type of architectural concrete reinforced with glass fiber. The significant advantages of this material include: plasticity, free form modeling, hardness, strength and resistance to destructive external factors (solar radiation, low temperatures, and corrosion), increased fire resistance (class A1 according to DIN), etc. According to the information of the concrete manufacturer, the material contains 2-5% glass fiber by weight in relation to the dry ingredients of the mixture. The mechanical and strength properties of GRFC concrete

w zakresie rozwiązań konstrukcyjnych, architektonicznych i energooszczędności. Zastosowana technologia GRC lub GFRC (ang. *Glass Fibre Reinforced Concrete*) to rodzaj betonu architektonicznego zbrojonego włóknem szklanym. Zdecydowane zalety tego materiału to m.in.: plastyczność, swobodne modelowanie formy, twardość, wytrzymałość i odporność na działanie destrukcyjnych czynników zewnętrznych (promieniowanie słoneczne, niskie temperatury i korozja), zwiększona odporność ogniowa (klasa A1 wg DIN) itd. Zgodnie z informacją producenta betonu materiał zawiera wagowo 2-5% włókna szklanego w stosunku do suchych składników mieszanki. Właściwości betonu typu GRFC zostały pod względem mechanicznym i wytrzymałościowym opisane w artykule *High performance glass fiber reinforced concrete* autorstwa D. Kumar, L.K. Rex, V.S. Sethuraman, V. Gokulnath oraz B. Saravanan (Kumar et al., 2020). W ramach prac badawczych ReSa zostały przeprowadzone badania próbek betonu GRFC. Technologia produkcji elementów polega na walcowaniu kolejnych warstw nakładanych metodą natrysku do wnętrza przygotowanej uprzednio formy. Włókna szklane będące częścią mieszanki betonowej i elementem zbrojenia rozproszonego betonu układają się w diagonalnie usytuowanych wiązkach zróżnicowanej grubości (od 5 do ok. 10 nici w jednym włóknie). Elementy wykonywane z GRFC są gładkie od strony formy (szalunku) i porowate od strony strefy podawania betonu i walcowania. Idea kształtowania obiektu była oparta na zasadzie 3R (Reduce, Recycle, Reuse), ze względu na możliwość ponownego użycia materiałów konstrukcyjnych w postaci warstwowych paneli samonośnych. Pierwszym etapem prac badawczych było przeprowadzenie badań optymalizacyjnych związanych z opracowaniem geometrii panelu warstwowego dla powłoki w układzie kopuły geodezyjnej. Dobór kształtu docelowego wynikał z konieczności zmniejszenia parametru Zwartości Bryły (Z), co wpłynęło bezpośrednio na energooszczędność obiektu. Analizie poddane zostały trzy wielkości kopuł geodezyjnych: kopuła o średnicy 6 m (geometria dwunastościanu foremnego), kopuła o średnicy 10 m (geometria dwudziestościanu foremnego) oraz kopuła o średnicy 12 m (geometria dwudziestościanu foremnego). Pierwszy wykonany prototyp badawczy w skali 1:1 stanowił dwunastościan foremny [Il. 3]. Równolegle prowadzone były badania związane z systemem połączeń krawędziowych oraz uszczelnianiem kopuły. Prowadzono badania w zakresie izolacyjności termicznej i mrozoodporności paneli, materiałowe badania niszczące, badania szczelności powietrznej oraz badania pracy kopuły pod obciążeniem. Symultanicznie zostały przeprowadzone badania architektoniczno-funkcjonalne. Obecnie trwają prace przygotowawcze do posadowienia prototypu nr 2 w skali 1:1 o średnicy 12 m. Założenia badawcze projektu grantowego ReSa stanowiły punkt wyjścia do dalszych badań zawartych w artykule.

4. Warianty rozwiązań funkcjonalno-przestrzennych kopuł geodezyjnych

Obiekty rekreacyjne są ważnym elementem polityki społecznej i gospodarczej każdego państwa i mają kluczowe

are described in the article *High performance glass fiber reinforced concrete* by D. Kumar, L.K. Rex, V.S. Sethuraman, V. Gokulnath, and B. Saravanan (2020). As part of ReSa's research work, GRFC concrete samples were tested. Elements production technology involves rolling successive layers applied by spraying them into the interior of a previously prepared mold. The glass fibers, which are part of the concrete mixture and an element of the dispersed concrete reinforcement, are arranged in diagonal bundles of varying thickness (from 5 to approximately 10 threads in one fiber). The elements made of GRFC are smooth on the form side (formwork) and porous on the side of the concrete feeding and rolling zone. The idea of shaping the facility was based on the 3R principle (Reduce, Recycle, Reuse), due to the possibility of reusing construction materials in the form of layered self-supporting panels. The first stage of the research work was to carry out optimization studies related to the development of the geometry of the sandwich panel for coating in the geodesic dome system. The selection of the target shape resulted from the need to reduce the Solid Compactness parameter (Z), which directly influenced the energy efficiency of the facility. Three sizes of geodesic domes were analyzed: a dome with a diameter of 6 m (geometry of

Il.3. Fragment modelu badawczego projektu ReSa: powłoka panelowa na bazie dwunastościanu foremnego, autor: Jakub Onyszkiewicz

Ill. 3. Part of the ReSa project research model: panel coating based on a regular dodecahedron, author: Jakub Onyszkiewicz



znaczenie we współczesnym społeczeństwie. Korzyści z zajęć rekreacyjnych powodują efekt synergiczny (Raslanas, Kliukas, Stasiukynas, 2016). Architektoniczne rozwiązania funkcjonalne wewnątrz wirtualnych modeli rekreacyjnych kopuł geodezyjnych zostały przeanalizowane w czterech aspektach:

1. rozwiązań jednoprzestrzennych,
2. rozwiązań z centralnym trzonem funkcjonalnym,
3. rozwiązań z obwodowym układem zabudowy meblowej,
4. rozwiązań z przestrzenią użytkową wydzieloną symetrycznie.

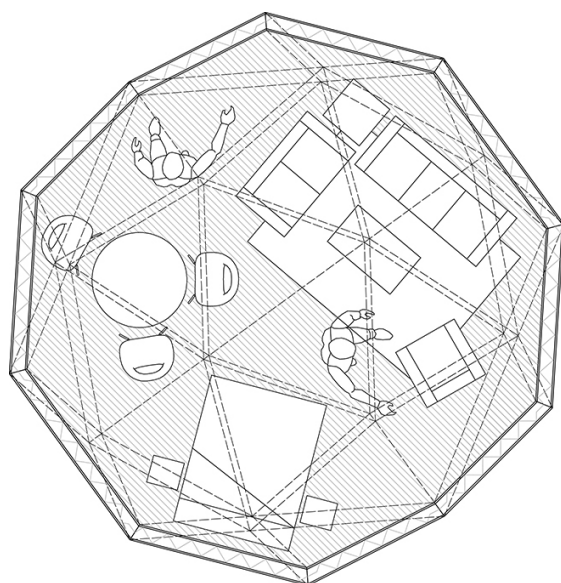
Do każdego z opisów zostały dodane schematy funkcjonalne dla poszczególnych typów kopuł: A (icosahedron – dwudziestościan foremny), B (dodecahedron – dwunastościan foremny), C (truncated Icosahedron – dwudziestościan ścięty), D (octahedron – ośmiościan foremny).

1. Rozwiązania jednoprzestrzenne to takie, w których układ wnętrza nie zostaje wydzielony dodatkowymi przegrodami pionowymi, a aranżacja funkcjonalno-przestrzenna polega na dowolnym ustawieniu zabudowy meblowej. Z perspektywy psychologicznego odbioru wnętrza zapewnione zostaje pełne odczuwanie całej przestrzeni, w tym struktury wewnętrznej kopuły ze wszystkimi elementami modułowymi, stanowiącymi powłokę konstrukcyjną i materiałową. W przypadku tego układu funkcjonalnego istnieje możliwość zastosowania mobilnych elementów wnętrza (mobilne ściany, struktury, zabudowy meblowe) [Il. 4].

2. Rozwiązania z centralnym trzonem funkcjonalnym to kierunek kształtowania wnętrza umożliwiający łączenie wszystkich stref funkcjonalnych, które nie wymagają zapewnienia dostępności światła słonecznego i lokalizowanie ich w centralnej strefie obiektu. Możliwe jest zapewnienie przeszkleń w dolnej strefie struktury kopułowej w postaci panoramicznego otwarcia wnętrza w układzie 360°. Alternatywnym rozwiązaniem dla tego typu układu jest możliwość lokalizowania strefy sypialnianej na centralnym trzonie funkcjonalnym (nad zabudową kuchenną i higieniczno-sanitarną) [Il. 5].

Il. 4. Poglądowe rozwiązanie funkcjonalno-przestrzenne dla układu jednoprzestrzennego dla kopuły typu A – dwudziestościan foremny, autor: Anna Berbesz

Ill. 4. Functional and spatial solution for a single-space layout for a type A dome – regular icosahedron, author: Anna Berbesz



a regular dodecahedron), a dome with a diameter of 10 m (geometry of a regular icosahedron) and a dome with a diameter of 12 m (geometry of a regular icosahedron). The first research prototype made on a scale of 1:1 was a regular dodecahedron [Ill. 3]. In parallel, research was carried out on the edge connection system and the sealing of the dome. Tests were carried out in the field of thermal insulation and frost resistance of panels, material destructive tests, air tightness tests, and tests of the dome's operation under load. Architectural and functional tests were carried out simultaneously. Preparatory work is currently underway for the foundation of prototype No. 2 on a 1:1 scale with a diameter of 12 m. The research assumptions of the ReSa grant project were the starting point for further research included in the article.

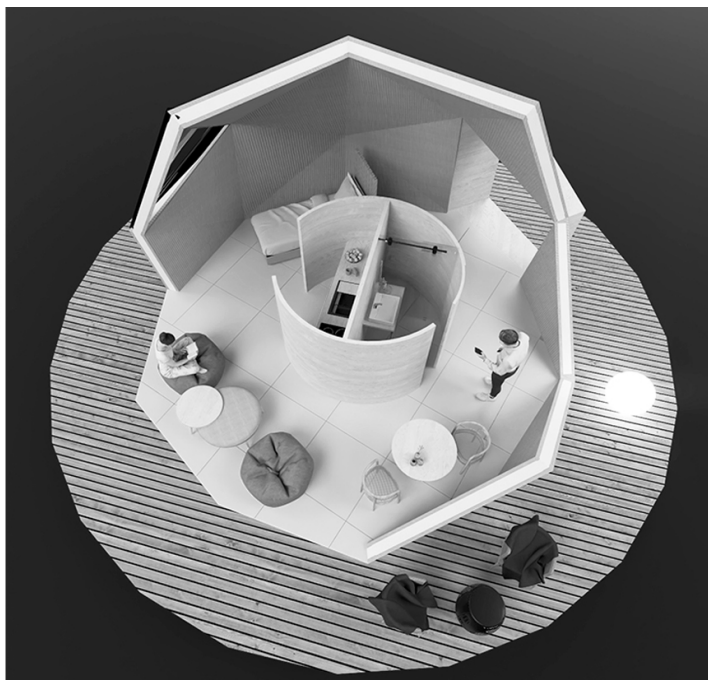
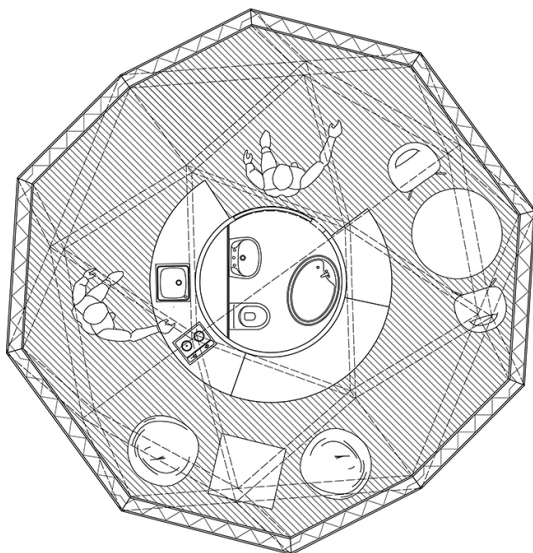
4. Variants of functional and spatial solutions of geodesic domes

Recreational facilities are an important element of the social and economic policy of every country and are of key importance in modern society. The benefits of recreational activities create a synergistic effect (Raslanas, Kliukas, Stasiukynas, 2016). The architectural functional solutions of the interiors of virtual models of recreational geodesic domes were analyzed in four aspects:

1. single-space solutions,
2. solutions with a central functional core,
3. solutions with a peripheral furniture arrangement,
4. solutions with symmetrically separated usable space.

Functional diagrams for individual types of domes have been added to each description: A (icosahedron – regular icosahedron), B (dodecahedron – regular dodecahedron), C (truncated Icosahedron – truncated icosahedron), D (octahedron – regular octahedron).





II. 5. Poglądowe rozwiązanie funkcjonalno-przestrzenne dla układu z centralnym trzonem funkcjonalnym dla kopuły typu A – dwudziestościan foremny, autor: Anna Berbesz

III. 5. Functional and spatial solution for a system with a central functional core for a type A dome – regular icosahedron, author: Anna Berbesz

3. Rozwiązania funkcjonalne z obwodowym układem aranżacji meblowej, koncentrycznie względem ścian zewnętrznych to kierunek rozwiązań funkcjonalno-przestrzennych umożliwiając łatwy dostęp do wszystkich elementów wnętrza, pozostawiając strefę centralną jako komunikacyjną. W tym przypadku istnieje możliwość modułowego zaprojektowania zabudowy meblowej [III. 6].

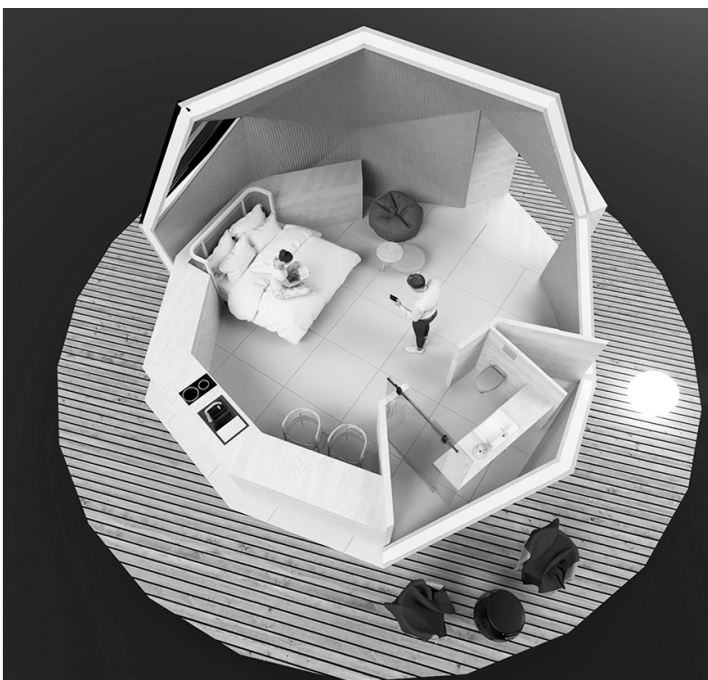
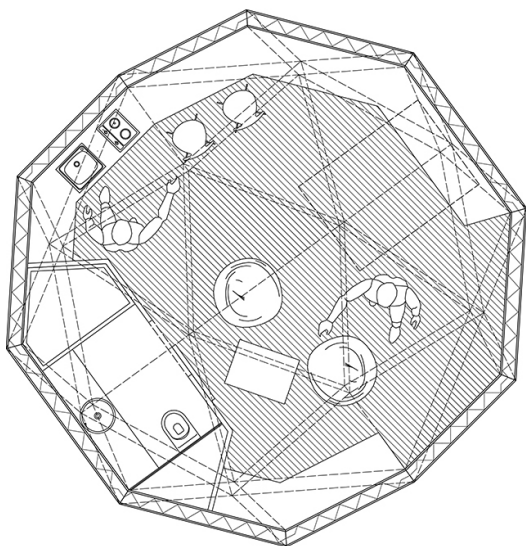
4. Rozwiązania funkcjonalne z przestrzenią użytkową wydzieloną symetrycznie [III. 19] i przeznaczeniem 1/2 powierzchni na strefę aneksu kuchennego i pomieszczenia higieniczno-sanitarnego zapewnia przestrzeń otwartą w 50%. W przypadku dużej rozpiętości kopuł możliwe

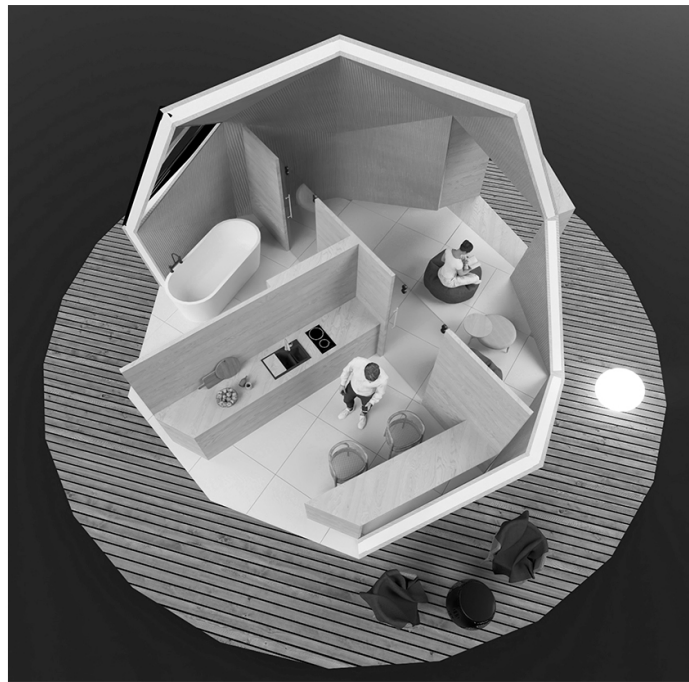
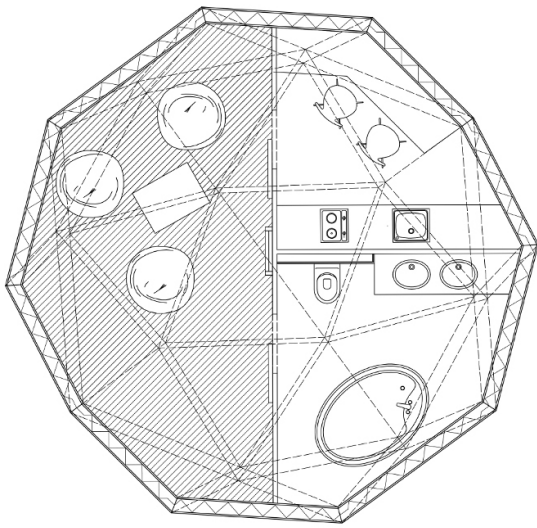
1. Single-space solutions are those in which the interior layout is not separated by additional vertical partitions, and the functional and spatial arrangement involves any arrangement of furniture. From the perspective of the psychological perception of the interior, a full feeling of the entire space is ensured, including the internal structure of the dome with all the modular elements constituting the structural and material coating. In the case of this functional arrangement, it is possible to use mobile interior elements (mobile walls, structures, furniture) [III. 4].

2. Solutions with a central functional core are

II. 6. Poglądowe rozwiązanie funkcjonalno-przestrzenne dla układu z obwodową aranżacją meblową dla kopuły typu A – dwudziestościan foremny, autor: Anna Berbesz

III. 6. Functional and spatial solution for a system with peripheral furniture arrangement for a type A dome – regular icosahedron, author: Anna Berbesz





Il. 7. Poglądowe rozwiązanie funkcjonalno-przestrzenne dla układu z obwodową aranżacją meblową dla kopuły typu A – dwudziestościan foremny, autor: Anna Berbesz

III. 7. Functional and spatial solution for a system with peripheral furniture arrangement for a type A dome – regular icosahedron, author: Anna Berbesz

jest wydzielenie strefy sypialnianej na przeznaczonej antresoli zlokalizowanej nad pomieszczeniami higienicznymi. Negatywny aspekt stanowi brak swobody i mobilności kształtowania przestrzeni, sztywność układu funkcjonalnego z czytelnym, ale niezmiennym rozwiązaniem zabudów meblowych [Il. 7].

5. Analizy geometryczne i porównanie wskaźników efektywności

W ramach prac badawczych wykorzystano 3 podstawowe typy wielościanów foremnych: ośmiościan foremny ($\frac{1}{2}$), dwunastościan foremny oraz dwudziestościan foremny. Zostały zbadane różnorodne warianty geometryczne w celu oszacowania optymalnych podziałów płaszczyzny poszczególnych paneli warstwowych stosowanych w kopule. W tym celu przeprowadzono projekcję krawędzi wielościanów na płaszczyznę sfery zewnętrznej z założeniem jednokrotnego podziału ich krawędzi. Wielościany bazowe zostały w trzech segmentach (A, B i C) obrócone w celu wskazania różnic i określenia ich optymalnego usytuowania względem projekcji. Obrót polegał na umiejscowieniu w górnej strefie krawędzi wielościanu (index 1), jego ściany (index 2) lub naroża (index 3). W efekcie otrzymano trzy modele dla kopuły geodezyjnej z dwudziestościanu foremnego (A1, A2 i A3), trzy modele dla kopuły geodezyjnej z dwunastościanu foremnego (B1, B2 i B3) i trzy modele dla kopuły geodezyjnej z dwudziestościanu ściętego (C1, C2 i C3). Przedmiot badania uzupełniono o dwa modele dla kopuły geodezyjnej z połowy ośmiościanu foremnego (D1 i D2) oraz część dwudziestościanu foremnego (E1) [Il. 8].

Uzyskane jednowarstwowe kopuły geodezyjne zostały przeskalowane tak, aby uzyskać zbieżną powierzchnię wewnętrzną netto wynoszącą 32,973 m², co odpowiada powierzchni netto kopuły wykonanej w ramach projektu ReSa i zapewnia możliwość porównania wyników.

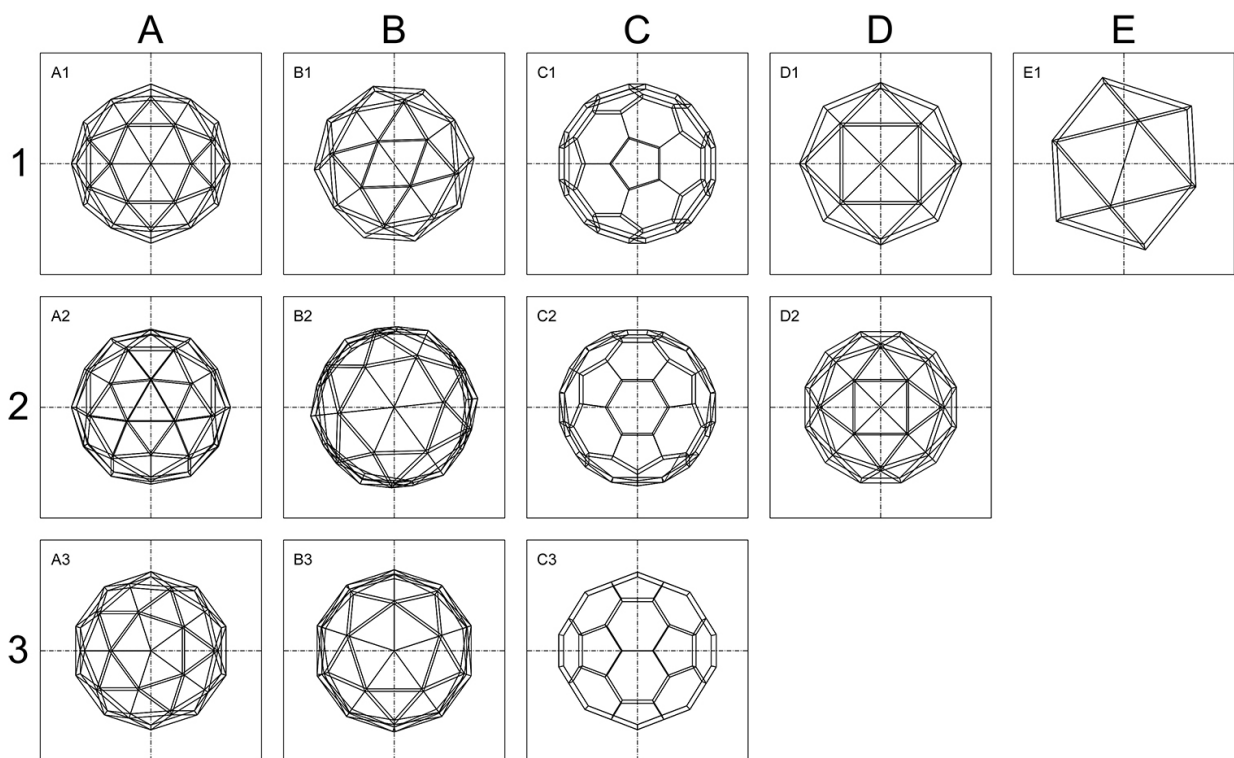
a direction in shaping the interior that allows combining all functional zones that do not require sunlight and locating them in the central zone of the facility. It is possible to provide glazing in the lower zone of the dome structure in the form of a 360° panoramic opening of the interior. An alternative solution for this type of arrangement is the possibility of locating the bedroom area on the central functional core (above the kitchen and hygienic-sanitary buildings) [III. 5].

3. Functional solutions with a peripheral arrangement of furniture, concentrically in relation to the external walls, is the direction of functional and spatial solutions enabling easy access to all interior elements, leaving the central zone as a communication zone. In this case, it is possible to design the furniture in a modular way [III. 6].

4. Functional solutions with symmetrically separated usable space [III. 19] and the allocation of $\frac{1}{2}$ of the area to the kitchenette and the hygiene and sanitary room ensures 50% open space. In the case of a large span of domes, it is possible to separate the bedroom area on a dedicated mezzanine located above the room. hygienic. The negative aspect is the lack of freedom and mobility in shaping the space, the rigidity of the functional system with a clear but unchanged furniture solution [III. 7].

5. Geometric analyzes and comparison of performance indicators

Three basic types of regular polyhedra were used in the research: a regular octahedron ($\frac{1}{2}$), a regular dodecahedron and a regular icosahedron. Various geometric variants were examined in order to estimate the optimal divisions of the plane of individual sandwich panels used in the dome. For this



Il. 8. Trzy podstawowe typy wielościanów foremnych wraz z ich wariantami poddanyymi analizie badawczej. A – trzy modele dla kopuły geodezyjnej na bazie dwudziestościanu foremnego (A1, A2, A3); B- trzy modele dla dwunastościanu foremnego (B1, B2, B3); C – trzy modele dla dwudziestościanu ściętego (C1, C2, C3); D – dwa modele z połowy ośmiościanu foremnego (D1, D2); E – część dwudziestościanu foremnego, autor: Jakub Onyszkiewicz

Ill. 8. Three basic types of regular polyhedra along with their variants subjected to research analysis. A – three models for a geodesic dome based on a regular icosahedron (A1, A2, A3); B- three models for a regular dodecahedron (B1, B2, B3); C – three models for the truncated icosahedron (C1, C2, C3); D – two models from half of a regular octahedron (D1, D2); E – part of a regular icosahedron, author: Jakub Onyszkiewicz

Na podstawie wstępnych analiz układu warstw i grubości paneli wykonywanych w ramach prac badawczych ustalono, iż analiza dotyczyć będzie kopuł geodezyjnych zbudowanych z paneli o grubości 21 cm. Odpowiada to dwóm warstwom grubości 1,0 cm GRC przenoszącym obciążenia (powłoka wewnętrzna i zewnętrzna) oraz 19 cm izolacji termicznej zlokalizowanej pomiędzy nimi. W wirtualnych modelach 3D kopuł wprowadzono grubości paneli.

Pomiary każdego modelu kopuły wykonano poprzez pobranie danych z modelu i obliczenie długości, pola i objętości poszczególnych elementów. Uzyskane dane opracowano oddzielnie dla każdego modelu i zagregowano w postaci zbiorczej tabeli wyników pomiarów [Tab. 1].

Wyjaśnienia dla sparametryzowanych kryteriów w tabeli w odniesieniu do opracowywanych wariantów kopuł geodezyjnych:

- POW. ZABUDOWY: powierzchnia kopuł wraz z powierzchniami bazowymi,
- WYSOKOŚĆ WEWN.: wysokość kopuł od poziomu 0,00 do szczytu wewnątrz skorupy,
- KUBATURA: objętość kopuł wewnątrz skorupy,
- LICZBA PANELI: całkowita liczba paneli,
- LICZBA TYPÓW PANELI: liczba różnych typów paneli,
- POW. WEWNĘTRZNA: powierzchnia skorupy od wewnątrz,
- POW. ZEWNĘTRZNA: powierzchnia skorupy od zewnątrz,
- OBJĘTOŚĆ PANELI: objętość paneli łącznie z ich grubością,

purpose, the edges of the polyhedra were projected onto the plane of the outer sphere, assuming that their edges were divided once. The base polyhedra in three segments (A, B and C) were rotated to indicate differences and determine their optimal location in relation to the projection. The rotation consisted in locating the edge of the polyhedron (index 1), its face (index 2) or its corner (index 3) in the upper zone. As a result, three models were obtained for a geodesic dome made of a regular icosahedron (A1, A2 and A3), three models for a geodesic dome made of a regular dodecahedron (B1, B2 and B3) and three models for a geodesic dome made of a truncated icosahedron (C1, C2 and C3). The subject of the study was supplemented with two models for a geodesic dome made of half of a regular octahedron (D1 and D2) and part of a regular icosahedron (E1) [Ill. 8].

The resulting single-layer geodesic domes were scaled to obtain a convergent net internal area of 32,973 m², which corresponds to the net area of the dome constructed as part of the ReSa project and provides the ability to compare the results. Based on preliminary analyzes of the layer arrangement and panel thickness performed as part of the research work, it was determined that the analysis would concern geodesic domes made of 21 cm thick panels. This corresponds to two layers of 1.0 cm thick load-bearing GRC (internal and external skin) and 19 cm of thermal insulation located between them. Panel thicknesses have been introduced in virtual 3D models of domes.

DOME SEGMENT			A			B			C			D		E
DOME NUMBER			A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3	D1	D2	E1
ROW No.	BASIC POLYHEDRON		ICOSAHEDRON			DODECAHEDRON			TRUNCATED ICOSAHEDRON			OCTAHEDRON		ICOSAHE- DRON
1	POW. NETTO / NET AREA	m	32,96											
2	POW. ZABUDOWY / BUILDING AREA	m2	37,50	37,50	37,53	37,55	37,89	37,50	37,56	37,69	37,55	38,11	37,65	37,77
3	WYSOKOŚĆ WEWN. / INTERNAL HIGHT	m	3,37	3,15	3,35	3,17	4,85	4,16	3,82	3,33	3,34	3,41	3,32	3,20
4	KUBATURA / INTERNAL VOLUME	m3	70,03	70,20	68,71	68,50	112,18	87,22	87,06	72,23	71,83	58,54	65,07	67,76
5	LICZBA PANELI / NB OF PANELS	nb	44	46	40	32	45	38	21	25	20	16	36	12
6	LICZBA TYPÓW PANELI / NB OF PANEL TYPES	nb	4	4	2	2	2	2	4	5	4	2	3	2
7	POW. WEWNĘTRZNA / INTERNAL SURFACE AREA	m2	66,25	66,36	65,41	65,64	101,87	80,96	82,45	69,81	68,62	60,71	63,34	67,38
8	POW. ZEWNĘTRZNA / EXTERNAL SURFACE AREA	m2	75,14	75,51	74,50	74,73	113,34	91,06	92,89	78,95	78,13	70,21	72,43	77,22
9	OBJĘTOŚĆ PANELI / PANELS VOLUME	m3	14,66	14,97	14,79	14,73	21,98	17,26	17,94	18,60	15,48	14,26	14,46	14,37
10	LICZBA PARTYCJI / NB OF PARTITIONS	nb	64	75	65	43	63	55	50	54	47	20	48	14
11	LICZBA TYPÓW PARTYCJI / NB OF PARTITION TYPES	nb	5	4	2	3	3	3	4	2	2	2	3	2
12	POW. PARTCJI / PARTITIONS AREA	m2	26,81	26,17	23,70	21,07	32,40	27,47	16,08	16,34	14,07	14,64	22,43	11,97
13	LICZBA POW. BAZOWYCH / NB OF BASE SURFACES	nb	8	12	10	10	9	10	10	3	3	8	12	6
14	POW. BAZY / BASE SURFACES AREA	m2	2,94	4,56	4,58	4,95	4,70	4,48	4,60	4,68	4,60	5,16	4,69	4,81
15	GRUBOŚCI PANELI / PANEL THICKNESSES	m	0,210	0,210	0,210	0,210	0,210	0,210	0,210	0,210	0,210	0,210	0,210	0,210
			0,212	0,212	0,212				0,216	0,216	0,216	0,222	0,213	
16	ELEWACJA ŚRODKA KOPUŁY / DOME CENTER ELEVATION	m	0,00	0,00	0,00	0,00	1,21	0,66	0,59	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00
17	DŁ. KRAWĘDZI ZEWN. / EXTERNAL EDGES LENGHT	m	142,62	147,71	135,91	124,90	175,20	153,27	95,75	96,58	86,68	89,01	129,35	78,17
18	DŁ. KRAWĘDZI WEWN. / INTERNAL EDGES LENGHT	m	135,44	138,48	127,35	117,05	167,22	144,77	90,22	90,98	81,23	82,78	120,91	72,84
19	LICZBA WĘZŁÓW / NB OF NODES	nb	29	30	26	24	28	26	40	44	40	13	25	10

Tab. 1. Tabela parametrów modeli badawczych, autor: Jakub Onyszkiewicz

Tab. 1. Table of parameters of research models, author: Jakub Onyszkiewicz

- LICZBA PARTYCJI: całkowita liczba powierzchni przegród pomiędzy panelami,
- LICZBA TYPÓW PARTYCJI: liczba różnych typów przegród pomiędzy panelami,
- POWIERZCHNIA PARTYCJI: powierzchnia brutto przegród pomiędzy panelami,
- LICZBA POWIERZCHNI BAZOWYCH: liczba powierzchni bazowych na poziomie 0,00,
- POW. BAZY: powierzchnia brutto powierzchni bazowych,

Measurements of each dome model were made by taking data from the model and calculating the length, area and volume of the individual elements. The obtained data were processed separately for each model and aggregated in the form of a collective table of measurement results [Tab. 1]. Explanations for the parameterized criteria in the table in relation to the geodesic dome variants being developed:

- GRUBOŚCI PANELI: różnica w grubościach paneli,
- ELEWACJA ŚRODKA KOPUŁY: elewacja środka projekcji kuli,
- DŁUGOŚĆ KRAWĘDZI ZEWNĘTRZNYCH: długość brutto wszystkich krawędzi od strony zewnętrznej,
- DŁUGOŚĆ KRAWĘDZI WEWNĘTRZNYCH: długość brutto wszystkich krawędzi od strony wewnętrznej,
- LICZBA WĘZŁÓW: całkowita liczba węzłów.

W badaniu efektywności geometrii wprowadzono 6 wskaźników efektywności geometrycznej. Wskaźniki te – zdaniem Autorów – mają znaczny wpływ na różne aspekty charakterystyki obiektu w tym: łatwość i czas montażu, minimalizacja połączeń (krawędzie, węzły), zmniejszanie masy, zwiększanie efektywności energetycznej. Geometryczne wskaźniki efektywności zdefiniowano jako [Il. 9]:

- DVE (ang. *Dome Volume Efficiency*) to objętość paneli w stosunku do objętości kopuły (wewnętrznej). Najniższa wartość wskazuje najlepszą wydajność. Zysk polega na stworzeniu maksymalnej objętości kopuły przy minimalnej ilości użytego materiału. Ma to jednocześnie decydujący wpływ na oddziaływanie obiektu na środowisko.
- DLE (ang. *Division Level Efficiency*) to liczba partycji w stosunku do liczby paneli. Najniższa wartość wskazuje najlepszą wydajność. Zaletą jest zminimalizowanie powierzchni połączeń co wpływa m.in. na wielkość strat energii przez liniowe mostki termiczne.
- DSE (ang. *Division Surface Efficiency*) to powierzchnia wewnętrzna w stosunku do powierzchni zewnętrznej. Najniższa wartość wskazuje najlepszą wydajność. Korzyścią jest wprowadzenie najbardziej efektywnego typu podziału kopuły.
- PTE (ang. *Panel Type Efficiency*) to liczba typów paneli w stosunku do liczby paneli brutto. Najniższa wartość wskazuje najlepszą wydajność. Korzyścią jest zmniejszenie liczby różnych paneli w procesie prefabrykacji i tym samym zmniejszenie oddziaływania obiektu na środowisko.
- PATE (ang. *Partition Type Efficiency*) to liczba partycji (bocznych płaszczyzn stycznych paneli) w stosunku do liczby typów partycji. Najniższa wartość wskazuje najlepszą wydajność. Zaletą jest zmniejszenie liczby różnych typów przegród w zależności od złożoności procesów montażu i demontażu kopuł.
- TD (ang. *Thickness Difference*) to różnica pomiędzy grubościami paneli. Najniższa wartość wskazuje najlepszą wydajność. Zaletą jest zastosowanie minimalnych paneli o różnej grubości, zgodnie z procesami prefabrykacji.

Celem określenia wskaźnika globalnego efektywności geometrycznej powłok (Wg) dokonano bezpośredniego sumowania wskaźników z założeniem, iż najniższa wykazana wartość oznaczać będzie najwyższą geometryczną efektywność:

$$Wg = DVE + DLE + DES + PTE + PATE$$

Wskaźniki efektywności geometrycznej [Il. 9] pozwoliły na wskazanie optymalnych pod względem geometrii – typu wielościanu bazowego, jego usytuowania i sposobu

- BUILDING AREA: the area of the domes including base surfaces.
- INTERNAL HEIGHT: height of the domes from level 0.00 to the top inside the shell.
- INTERNAL VOLUME: volume of the domes inside the shell.
- NUMBER OF PANELS: total number of panels.
- NUMBER OF PANEL TYPES: number of different types of panels.
- INTERNAL SURFACE AREA: the area of the shell from the inside.
- EXTERNAL SURFACE AREA: the area of the shell from the outside.
- PANELS VOLUME: the volume of panels including their thicknesses.
- NUMBER OF PARTITIONS: total number of partition surfaces between panels.
- NUMBER OF PARTITION TYPES: the number of different types of partitions between panels.
- PARTITIONS AREA: gross area of the partitions between panels.
- NUMBER OF BASE SURFACES: the number of base surfaces on level 0.00.
- BASE SURFACES AREA: gross area of base surfaces.
- PANEL THICKNESSES: difference in panels thicknesses.
- DOME CENTER ELEVATIONS: sphere projection center elevation.
- EXTERNAL EDGES LENGTH: gross length of all of the edges from the outside.
- INTERNAL EDGES LENGTH: gross length of all of the edges from the inside.
- NUMBER OF NODES: total number of nodes.

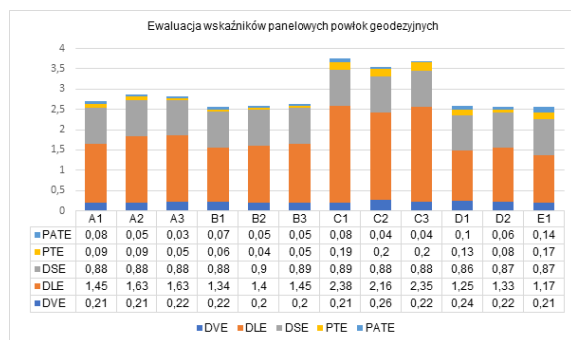
In the geometry efficiency study, 6 geometric efficiency indicators were introduced. Geometric efficiency indicators were defined as [Il. 9], [Tab. 2]:

- DVE (Dome Volume Efficiency) is the volume of the panels in relation to the volume of the dome (internal). The lowest value indicates the best performance. The gain is in creating the maximum volume of the dome with the minimum amount of material used.
- DLE (Division Level Efficiency) is the number of partitions in relation to the number of panels. The lowest value indicates the best performance. The advantage is that the connection area is minimized.
- DSE (Division Surface Efficiency) is the internal surface in relation to the external surface. The lowest value indicates the best performance. The benefit is the introduction of the most effective type of dome division.
- PTE (Panel Type Efficiency) is the number of panel types in relation to the number of gross panels. The lowest value indicates the best performance. The benefit is to reduce the number of different panels in the prefabrication process.
- PATE (Partition Type Efficiency) is the number of partitions (side tangential planes of panels)

1	2											
Wskaźniki / INDICATOR	Typ Kopuły / DOME TYPE											
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3	D1	D2	E1
Wskaźniki globalne (geometria) / GLOBAL INDICATOR	2,71	2,86	2,81	2,57	2,59	2,64	3,75	3,54	3,69	2,58	2,56	2,56

Tab. 2. Podsumowanie wskaźników efektywności geometrycznej, autor: Kajetan Sadowski

Tab. 2. Table of geometrical efficiency indicators, author: Kajetan Sadowski



II. 9. Wskaźniki efektywności geometrycznej, Autor: Kajetan Sadowski

III. 9. Geometric performance indicators, author: Kajetan Sadowski

rzutowania struktur. W ewaluacji pominięto wskaźnik TD, który nie wskazuje bezpośrednio geometrycznej efektywności i jest związany głównie z procesem prefabrykacji. Dążeniem tego procesu jest zmniejszenie ilości paneli o różnych wymiarach oraz zmniejszenie ilości paneli o różnej grubości. Wskaźnik DVE wskazuje największą efektywność kopuły B2 i B3, najniższą natomiast C2 i D1. Pozostałe kopuły wykazują średnie stany efektywności. Największa efektywność stopnia podziału (DLE) została wykazana dla kopuły E1 i D1, najniższa natomiast dla kopuł wykonanych na bazie dwudziestościanu ściętego: C1, C2 i C3. Wskaźnik PTE oznaczył najwyższą efektywność dla kopuł B2, B3 i A3, najniższą natomiast raz jeszcze dla kopuł wykonanych na bazie dwudziestościanu ściętego: C1, C2 i C3. PATE, czyli współczynnik efektywności dotyczący typów płaszczyzn podziału wskazuje na najwyższą efektywność w przypadku kopuły A3, najniższą natomiast dla kopuły E1. Potwierdzone zostało, że jedynie dla kopuły zbudowanej na podstawie dwunastościanu foremnego (B1, B2, B3) oraz dla wielościanu w postaci dwudziestościanu foremnego (E1) panele zachowują stałą grubość w związku ze współczynnikiem TD równym w tych przypadkach 0. Globalna suma wskaźników geometrycznych pozwoliła oznaczyć najlepszą efektywność geometryczną dla kopuł E1, D2 i B1 oraz najniższą dla kopuł segmentu C (C1, C2 i C3), a graficzna prezentacja wyników badania pozwala stwierdzić, iż największa dysproporcja występuje w przypadku wskaźnika DLE (ang. *division level efficiency*) obrazującego stosunek ilości podziałów (krawędzi) w stosunku do ilości paneli. Można zatem stwierdzić, że zestaw kopuł na bazie dwunastościanu ściętego (głównie z uwagi na liczbę powierzchni stycznych – partycji) będzie najmniej efektywny w przypadku powłok panelowych. Suma wskaźników pozostałych

in relation to the number of partition types. The lowest value indicates the best performance. The advantage is a reduction in the number of different types of partitions depending on the complexity of the dome assembly and disassembly processes.

- TD (Thickness Difference) is the difference between the thicknesses of the panels. The lowest value indicates the best performance. The advantage is the use of minimal panels of different thicknesses, according to prefabrication processes.

In order to determine the global index of geometric efficiency of coatings (Wg), the indices were directly summed (Wg) with the assumption that the lowest demonstrated value will mean the highest geometric efficiency:

$$Wg = DVE + DLE + DES + PTE + PATE$$

Geometric efficiency indicators [III. 9] allowed for the identification of optimal structures in terms of geometry – the type of base polyhedron, its location and projection method. The evaluation omitted the TD indicator, which does not directly indicate geometric efficiency and is mainly related to the prefabrication process. The aim of this process is to reduce the number of panels of different dimensions and to reduce the number of panels of different thickness. The DVE index indicates the highest efficiency of domes B2 and B3, while the lowest efficiency of domes C2 and D1. The remaining domes show average efficiency states. The highest efficiency of the division degree (DLE) was demonstrated for domes E1 and D1, while the lowest for domes made on the basis of a truncated icosahedron: C1, C2 and C3. The PTE index marked the highest efficiency for domes B2, B3 and A3, and the lowest once again for domes made on the basis of a truncated icosahedron: C1, C2 and C3. PATE, i.e. the efficiency coefficient regarding the types of dividing planes, indicates the highest efficiency in the case of the A3 dome, and the lowest for the E1 dome. It was confirmed that only for the dome built on the basis of a regular dodecahedron (B1, B2, B3) and for a polyhedron in the form of a regular icosahedron (E1) the panels maintain a constant thickness due to the TD coefficient equal to 0 in these cases. The global sum of geometric indicators allowed us to determine the best geometric efficiency for domes E1, D2 and B1, and the lowest for domes of segment C (C1, C2 and C3), and the graphical presentation of the test results allows us to conclude that the greatest disproportion occurs in the case of the DLE indicator (DLE). division

wariantów oscyluje wokół wartości 2.5 i wybór wariantu do realizacji zależy może od innych, obiektywnych czynników takich jak tempo prefabrykacji, ilość różnych paneli oraz ewentualna dysproporcja grubości paneli w związku z geometrią rzutowania. W związku z faktem, iż proces montażu panelowych powłok geodezyjnych jest działaniem wieloaspektowym, zależnym w dużym stopniu od możliwości prefabrykacji i warunków lokalnych (w tym klimatycznych), możliwe jest uzupełnienie badania o zmienne środowiskowe takie jak zużycie energii, ślad węglowy, obciążenia przekazywane na fundament i nadanie różnych wag projektowanym kryteriom.

6. Podsumowanie

Analizy geometryczne, w tym badania powłoki konstrukcyjnej dla samonośnych paneli warstwowych pokazują szeroki wachlarz możliwości zastosowania kopuł geodezyjnych jako rozwiązań mobilnych pełniących funkcję rekreacyjną. Architektura mobilna w środowisku lądowym i wodnym stanowi alternatywny kierunek kształtowania środowiska mieszkaniowego, ze szczególnym uwzględnieniem obiektów o funkcji rekreacyjnej. Struktury przenośne mogą pełnić również funkcję integracji dla użytkowników, stanowiąc łącznik między naturą, architekturą i człowiekiem – użytkownikiem. Implementacja GRC do budowy sprawdzonych doświadczalnie paneli pozwala na budowę demontowalnych (tu: mobilnych), rekreacyjnych powłok geodezyjnych. Dzięki szczelności systemu oraz możliwości montażu warstwy ocieplenia wewnątrz trójwarstwowych paneli obiekty te stają się odporne na niekorzystne bytowanie zjawisk atmosferycznych takich jak opady oraz wysokie i niskie temperatury. Dzięki tym właściwościom mogą być przeznaczone do całorocznego użytkowania. Optymalizacja geometryczna powłok pozwala na skrócenie czasu prefabrykacji, montażu powłok oraz minimalizacji ilości krawędzi i połączeń. We wspomnianym projekcie ReSa zdecydowano o montażu powłoki na bazie modelu B3 (na bazie dwunastościanu foremego pierwszym stopniem podziału krawędzi i narożem w szczycie powłoki) zapewniającą dwa typy paneli o stałej grubości 21 cm. Pozwoliło to na montaż kopuły w czasie krótszym niż 7 dni i bez konieczności wykonywania głębokiego posadowienia.

Jak pokazały iteracyjne badania, układy funkcjonalno-przestrzenne obiektów o rzucie centralnym umożliwiają wieloaspektowe aranżacje w zależności od potrzeb użytkowników. Obiekty rekreacyjne na bazie kopuł geodezyjnych mogą być realizowane indywidualnie (z centralnym lub bocznym segmentem sanitarnym) lub łączone w wielofunkcyjne zespoły i rozdzielaniem strefy dziennej, nocnej (prywatnej) i gospodarczej (sanitarnej). Analizy materiałowe, przestrzenne, geometryczne i konstrukcyjne pokazują, że możliwości prowadzenia badań eksperymentalnych, w szczególności w zakresie zastosowania samonośnych paneli, stanowią bogate źródło wiedzy dla architektów i konstruktorów. Przedstawione badania stanowią swoistą kontynuację dziedzictwa R.B. Fullera w zakresie kształtowania współczesnych rozwiązań kopułowych.

level efficiency) showing the ratio of the number of divisions (edges) to the number of panels. It can therefore be concluded that a set of domes based on a truncated dodecahedron (mainly due to the number of contact surfaces – partitions) will be the least effective in the case of panel coatings. The sum of the indicators of the remaining variants oscillates around the value of 2.5 and the choice of the variant for implementation may depend on other, objective factors such as the pace of prefabrication, the number of different panels and possible disproportion in the thickness of the panels due to the projection geometry. Due to the fact that the process of installing geodetic panel coatings is a multi-aspect activity, depending largely on the possibility of prefabrication and local conditions (including climatic conditions), it is possible to supplement the study with environmental variables such as energy consumption, carbon footprint, loads transferred to the foundation.) and assigning different weights to the designed criteria.

6. Summary

Geometric analyzes, including tests of the structural coating for self-supporting sandwich panels, show a wide range of possibilities of using geodesic domes as mobile solutions with a recreational function. The implementation of GRC in the construction of experimentally proven panels allows for the construction of removable (here: mobile), recreational geodetic coatings. Due to the tightness of the system and the possibility of installing an insulation layer inside three-layer panels, these facilities become resistant to unfavorable atmospheric phenomena such as rain and high and low temperatures. Geometric optimization of coatings allows for a reduction in pre-fabrication and assembly times. In the mentioned ReSa project, it was decided to install a coating based on the B3 model (based on a regular dodecahedron with the first degree of edge division and a corner at the top of the coating) providing two types of panels with a constant thickness of 21 cm. This allowed the dome to be assembled in less than 7 days and without the need for deep foundations. As iterative research has shown, functional and spatial arrangements of central-plan buildings enable multi-aspect arrangements depending on the needs of users. Recreational facilities based on geodesic domes can be built individually (with a central or side sanitary segment) or combined into multifunctional complexes with a separation of day, night (private), and utility (sanitary) zones.

Material, spatial, geometric, and structural analyzes show that the possibilities of conducting experimental research, in particular in the use of self-supporting panels, are a rich source of knowledge for architects and constructors. The research presented is a continuation of R. B. Fuller's legacy in shaping contemporary dome solutions.

PRZYPISY / ENDNOTES

- ¹ Informacje o projekcie *Hypercubus* grupy WG3 dostępne na stronie: <https://www.wg3.at/projekt/hypercubus/> (odsłona z dnia 22.08.2023 r.)
- ² Informacje techniczne dotyczące drewna prasowanego krzyżowo typu CLT dostępne na stronie: <https://www.apawood.org/cross-laminated-timber> (odsłona z dnia 22.08.2023 r.)
- ³ Informacje o patencie US2905113A: *Self-Strutted Polydome* autorstwa R. B. Fullera dostępne na stronie: <https://patents.google.com/patent/US2905113A/en> (odsłona z dnia 22.08.2023 r.)
- ⁴ Informacje o patencie US7434359B2: *Constructing geodesic dome with panels* autorstwa Davida S. Geigera dostępne na stronie: <https://patents.google.com/patent/US7434359B2/en> (odsłona z dnia 22.08.2023 r.)

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] Barwicka J., 2010, Biomimikra. Czerpiąc z natury, w: Green2, Biometyka, Ogólnopolski kwartalnik – Architektura – Rewitalizacja – Zrównoważony rozwój, nr 2, s. 36-44.
- [2] Berbesz A., 2019, Mikro-struktury w przestrzeni miejskiej w aspekcie zrównoważonego rozwoju, w: Housing Environment, Dom w mieście, 27(2019), s.
- [3] Bober W., Stobiecki P., 2022, Experimental geodesic dome with a sandwich panels structure, w: IHIET-AI2022 7th International Conference on Human Interaction & Emerging Technologies, Artificial Intelligence & Future Applications, Centre Hospitalier Universitaire Vaudois (CHUV), Lausanne, Szwajcaria.
- [4] Fuller R.B., 1969, Operating Manual for Spaceship Earth, Washington D.C.: Southern Illinois University Press, s. 13.
- [5] Gythiel W., Mommeyer C., Raymaekers T., Schevenels M., 2020, A Comparative Study of the Structural Performance of Different Types of Reticulated Dome Subjected to Distributed Loads, w: Frontiers in Built Environment, nr 6.
- [6] Morgan G. J., 2003, Historical review: Viruses, crystals and geodesic domes, Trends in Biochemical Sciences, Volume 28, Issue 2, s. 86-90.
- [7] Kronenburg R., 2008, Portable architecture. Design and Technology, Boston, Berlin Birkhauser, Verlag AG.
- [8] Kumar D., Rex L.K., Sethuraman V.S., Gokulnath V., Saravanan B., 2020, High performance glass fiber reinforced concrete, w: Materials Today: Proceedings 33, s. 784-788.
- [9] Raslanas S., Kliukas R., Stasiukynas A., 2016, Sustainability assessment for recreational buildings, w: Civil Engineering and Environmental Systems.

- ¹ Internet source: <https://www.wg3.at/projekt/hypercubus/> (accessed: 22.08.2023 r.)
- ² Internet source: <https://www.apawood.org/cross-laminated-timber> (accessed: 22.08.2023 r.)
- ³ Internet source: <https://patents.google.com/patent/US2905113A/en> (accessed: 22.08.2023 r.)
- ⁴ Internet source: <https://patents.google.com/patent/US7434359B2/en> (accessed: 22.08.2023 r.)

- [10] Rossi M., 2012, The Fuller's heritage: organic models and artificial microcosm in XX century domes, International Congress Domes In The World conference paper.
- [11] Sadowski K., 2020, Efemeryczna wizja zrównoważonego świata Buckminstera Fullera, w: Inside out outside in: budowanie mostów pomiędzy sztuką a humanistyką, wiedzą a technologią, red. Waldemar Bober, Wydawnictwo Księgarnia Akademicka, Kraków, s. 131-145.
- [12] Samuel N., 2012, The Islands of Benoît Mandelbrot: Fractals, Chaos, and the Materiality of Thinking, Bard Graduate Center.
- [13] Schreibmayer P., 2009, one2one minimal space minimal housing, Verlag d. Technischen Universität Graz.
- [14] Stobiecki P., 2020, Pierścieniowe kopuły stereograficzne, w: Inside out outside in: budowanie mostów pomiędzy sztuką a humanistyką, wiedzą a technologią, red. Waldemar Bober, Wydawnictwo Księgarnia Akademicka, s. 158-182.

ŹRÓDŁA INTERNETOWE/ ONLINE SOURCES

- [1] <https://www.wg3.at/projekt/hypercubus/> (odsłona z dnia 22.08.2023 r.)
- [2] <https://www.apawood.org/cross-laminated-timber> (odsłona z dnia 22.08.2023 r.)
- [3] <https://patents.google.com/patent/US2905113A/en> (odsłona z dnia 22.08.2023 r.)
- [4] <https://patents.google.com/patent/US7434359B2/en> (odsłona z dnia 22.08.2023 r.)