



Politechnika Wroclawska

Rozprawa doktorska
**Determinanty w kształtowaniu
analogowych habitatów kosmicznych**

mgr inż. arch. Leszek Orzechowski

Promotor Prof. dr hab. inż. Romuald Tarczewski
Promotor pomocniczy Dr inż. arch. Jerzy Łątka

Wydział Architektury
Politechnika Wroclawska
Wroclaw, 2023

Spis treści

1	Wstęp	9
1.1	Wprowadzenie do problemu badawczego	9
1.2	Załogowa eksploracja przestrzeni kosmicznej – nowa nisza ekologiczna	9
1.3	Architektura kosmiczna – nowa gałąź architektury	17
1.3.1	Kosmiczni architekci.....	25
1.3.2	Metoda pracy architekta kosmicznego	29
1.4	Analogowe symulacje misji oraz analogowe habitaty kosmiczne (AHK) – naukowe podejście do przygotowania się do życia poza Ziemią.....	34
2	Cel pracy	37
2.1	Przyczyny podjęcia tematu.....	37
2.2	Tezy pracy.....	38
2.3	Pytania badawcze.....	38
2.4	Zakres pracy	38
3	Analogowe symulacje misji – stan badań	41
3.1	Analogowe Symulacje Misji oraz analogowe habitaty kosmiczne	41
3.2	Analogowe symulacje misji przed 1991r.....	44
4	Kryteria oceny analogowych habitatów kosmicznych na podstawie badań literaturowych	47
4.1	Podstawowe cele: projektowanie załogowych misji kosmicznych i architektura misji.....	47
4.1.1	Podstawowe ograniczenia: Logistyka kosmiczna	47
4.1.2	Architektura misji, czyli planowanie misji kosmicznych	50
4.1.3	NASA Mars Reference Missions	52
4.2	Forma i funkcja – badanie architektury kosmicznej	56
4.2.1	Projektowanie habitatów kosmicznych pod kątem wyzwań środowiskowych oraz technologicznych	57
4.2.2	Strefowanie funkcji	61
4.2.3	Typy konstrukcji dla kosmicznej architektury.....	65
4.2.4	Typologia architektury kosmicznej.....	69
4.2.5	Określanie gotowości technologicznej (TRL) architektury kosmicznej.....	72
4.2.6	TRL dla modeli oraz symulatorów	73
4.2.7	Technologie spin-in oraz spin-off.....	74

4.3	Ergonomia: analizy NASA odnośnie ergonomii historycznych po- jazdów kosmicznych.....	75
5	Przegląd oraz analiza wybranych przykładów analogowych habi- tatów kosmicznych	79
5.1	Bios-3	81
5.2	Aquarius Reef Base	85
5.3	FMARS.....	88
5.4	Mars Desert Research Station (MDRS)	92
5.5	Stacja Concordia	96
5.6	IBMP.....	100
5.7	HERA	104
5.8	HALLEY VI.....	108
5.9	HI-SEAS	113
5.10	Lunar Palace 1.....	117
5.11	SHEE	121
5.12	HESTIA.....	125
5.13	MEERS	129
5.14	LunAres	132
5.15	ILMH.....	137
5.16	ExoHab	141
5.17	Kepler Station.....	143
5.18	D-Mars.....	146
5.19	EDEN-ISS.....	149
5.20	CELSS.....	152
5.21	MAMBA	157
5.22	LUNARK.....	161
5.23	Hydronaut H03 DeepLab	165
5.24	FlexHab i Luna	168
5.25	MDA.....	171
5.26	SAM.....	175
6	Synteza i interpretacja wyników	178
6.1	Analiza porównawcza wybranych analogowych habitatów kosmicz- nych.....	178
6.1.1	Lata powstawania analogowych habitatów kosmicznych.....	178
6.1.2	Lokalizacja analogowych habitatów kosmicznych.....	179
6.1.3	Typ architektury kosmicznej analogowych habitatów ko- smicznych	181
6.1.4	Systemy konstrukcyjne analogowych habitatów kosmicznych	182
6.1.5	Zastosowanie technologii Spin-in/ Spin-off w analogowych habitatach kosmicznych.....	183
6.1.6	Poziom gotowości do zamieszkania (HRL) analogowych ha- bitatów kosmicznych.....	184
6.1.7	Poziom gotowości technologicznej analogowych habitatów kosmicznych.....	185
6.1.8	Technologiczny poziom wierności analogowych habitatów kosmicznych.....	186

6.1.9	Cechy operacyjne analogowych habitatów kosmicznych . . .	186
6.1.10	Operacyjny poziom wierności analogowych habitatów kosmicznych.....	189
6.1.11	Cechy naukowe analogowych habitatów kosmicznych.....	190
6.1.12	Forma i funkcja analogowych habitatów kosmicznych.....	192
6.2	Determinanty w kształtowaniu formy analogowych habitatów kosmicznych	200
6.3	Typologia analogowych habitatów kosmicznych.....	201
7	Wnioski i dalsze prace badawcze	207
7.1	Przeprowadzone analizy	207
7.2	Odpowiedzi na pytania badawcze.....	208
7.3	Dodatkowe pytania wynikające z przeprowadzonych badań.....	214
7.4	Weryfikacja tez pracy	216
7.5	Podsumowanie	216
	Spis rysunków	217
	Spis tabel	223

Streszczenie

Rozprawa doktorska, zatytułowana „Determinanty w kształtowaniu analogowych habitatów kosmicznych” dotyczy konstrukcji tworzonych w celu testowania technologicznych, naukowych oraz operacyjnych aspektów przyszłych pojazdów, stacji oraz baz kosmicznych. Budowa takich instalacji na Ziemi i ich testy, zarówno inżynieryjne, jak i medyczno-psychologiczne dotyczące ludzi przebywających i pracujących w tych zamkniętych miejscach, stanowi niezbędny etap prób i testów przed wysłaniem ludzi na wielodniowe, wielomiesięczne, a w dalszej perspektywie wieloletnie wyprawy kosmiczne. Jeszcze kilka lub kilkanaście lat temu zapotrzebowanie na tego typu instalacje było niewielkie, a badania prowadzono w ograniczonym zakresie. W ostatnich latach, wraz z nowymi programami załogowych lotów na Księżyc szybko rośnie ilość budowanych testowych habitatów i jest to związane z eksploracją kosmosu planowaną przez światowe agencje kosmiczne, ale też przez prywatnych inwestorów. Rolą architektury kosmicznej jest odpowiadanie na potrzeby ludzi, tworzenie im dogodnych i bezpiecznych warunków dla życia i pracy – nawet jeśli grono odbiorców jest obecnie niewielkie, to przecież życie i zdrowie każdego człowieka jest wartością nadrzędną. Opracowania na temat analogowych habitatów kosmicznych pojawiają się w literaturze coraz częściej i autor ma świadomość, że musi zmierzyć się z już dostępną literaturą, a jego dysertacja i badania powinny mieć element nowości. Autor jest twórcą 2 zbudowanych już habitatów i projektantem kilku innych, planowanych habitatów. Czynny obecnie habitat o nazwie LunAres znajduje się w Polsce, w Pile na dawnym lotnisku wojskowym.

Celem pracy było zebranie rozproszonych informacji o istniejących analogowych habitatach kosmicznych (AHK), a następnie ich porównanie i wyciągnięcie wniosków dotyczących konstrukcji, funkcji, a również perspektyw rozwoju. Końcowe wnioski można przedstawić następująco:

1. Głównymi rozpoznanymi determinantami w kształtowaniu analogowych habitatów kosmicznych są: logistyka i architektura kosmiczna, symulowana architektura misji oraz zasadniczy cel badawczy omawianych placówek.
2. Na podstawie przeprowadzonej analizy można było stworzyć podstawową typologię złożoną z 4 typów analogowych habitatów kosmicznych: symulacyjnych, prototypowych, biotechnologicznych oraz adaptowanych.
3. Badania koncepcyjne jak i misje realizowane w analogowych habitatach kosmicznych to nowa, szybko rozwijająca się gałąź badań i biznesu przyciągająca dużą uwagę zarówno naukowców jak i inwestorów.

Można żywić nadzieję, że podjęta praca przyczyni się do poprawy projektów i funkcjonalności przyszłych analogowych habitatów kosmicznych.

Abstract

The doctoral dissertation, titled "Determinants in Shaping Analog Space Habitats" revolves around the construction of structures aimed at testing the technological, scientific, and operational aspects of future vehicles, stations, and space habitats. Building these installations on Earth and carrying out both engineering and medical-psychological tests on the individuals living and working within these enclosed environments is a necessary step before sending humans on multi-day, multi-month, or potentially multi-year space expeditions. Until a couple or twenty years ago, the demand for such installations was small, and research was conducted on a limited scale. However, with the recent programs for manned lunar flights, the number of test habitats being built is rapidly increasing. This development aligns with the exploration of space planned by world space agencies and private investors. Space architecture's role is to meet human needs, providing convenient and safe living and working conditions. Even though the current number of recipients is small, the life and health of every individual is of paramount importance. Studies on analog space habitats are increasingly appearing in the literature. It is aware of the need to engage with existing literature and ensure his research brings a novel element to the field. The author is the creator of two constructed habitats and the designer of several yet unrealized ones. The habitat named LunAres is built in Poland, in Piła, on a former military airfield

The objective of the study was to gather scattered information about existing Analog Space Habitats (ASH), subsequently compare them, and draw conclusions regarding their construction, functions, and development perspectives. The final conclusions can be presented as follows:

1. The main identified determinants in shaping analog space habitats are: space logistics and architecture, simulated mission architecture, and the fundamental research objective of the discussed facilities.
2. Based on the conducted analysis, a basic typology consisting of 4 types of analog space habitats could be created: simulative, prototypical, biotechnological, and adapted.
3. Conceptual research and missions carried out in analog space habitats constitute a new, rapidly developing branch of research and business attracting significant attention from both scientists and investors.

It is possible to suppose that the work undertaken will contribute to improving the designs and functionality of future analog space habitats.

Podziękowania

Słowo dziękuję często nie wystarcza, aby wyrazić, jak bardzo jestem wdzięczny za wszelką pomoc, jaką otrzymałem podczas pracy nad tym doktoratem. Mimo to, chcę je dziś skierować do kilku kluczowych osób.

Profesorowi dr. hab. arch. Robertowi Masztalskiemu – z ogromną wdzięcznością wspominam naszą wieloletnią współpracę. Kiedy rozpoczynałem swoją drogę, wiele z obiektów, o których później pisałem, nie istniało jeszcze. Cierpliwość i życzliwość Profesora były dla mnie wsparciem w tych początkowych etapach.

Profesorowi dr. hab. Romualdowi Tarczewskiemu, dziękuję za wsparcie i zaufanie, które mi okazał, obejmując opiekę nad moją pracą i pomagając mi doprowadzić ją do końca. Wkład Pana Profesora w moje teoretyczne projekty z zakresu architektury kosmicznej na początkowym etapie mojej kariery był nieoceniony.

Panu Doktorowi arch. Jerzemu Łątce, dziękuję za motywację, jaką we mnie wzbudził i umacniał, aby zakończyć tę pracę. Jego żmudna praca redakcyjna pomogła mi przekształcić „surowy tekst” w gotową pracę.

I na koniec, chciałbym podziękować moim rodzicom Alicji i Kazimierzowi Orzechowskiemu, którzy latami, niesłabnąco, wspierali mnie w karierze naukowej i wierzyli, że ta praca powstanie. Szczególne podziękowania kieruję do mojego ojca, mimo że jego własna kariera naukowa toczy się w zupełnie innej dziedzinie, był w stanie niesłabnąco wspierać mnie w dokończeniu redakcji tej pracy. Gdyby istniała instytucja promotora honorowego, z pewnością powinien być nim mój ojciec.

Dziękuję wszystkim za wsparcie i cierpliwość, które były dla mnie tak cenne podczas tej naukowej podróży.

1 Wstęp

„Ziemia jest kolebką Ludzkości, ale nikt nie zostaje w kołysce na wieki”

Konstantyn Ciołkowski, 1903[1]

Praca dotyczy analogowych habitatów kosmicznych (AHK) służących do symulowania oraz testowania różnorodnych aspektów związanych z załogowymi misjami kosmicznymi. W celu usystematyzowania wiedzy na ich temat podjęta zostanie próba kategoryzacji tego typu architektury.

1.1 Wprowadzenie do problemu badawczego

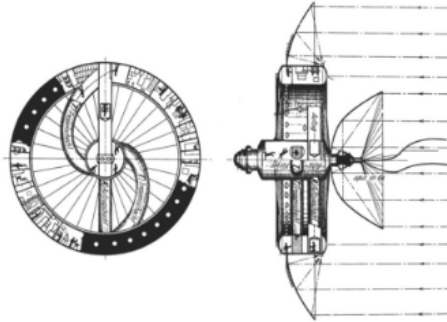
Poruszanie problemu badawczego, jakim są analogowe habitaty kosmiczne wymaga zwięzłego przedstawienia kontekstu historycznego dotyczącego załogowych lotów kosmicznych i planów zasiedlania innych planet, a także roli architektów w działaniach związanych z tą tematyką. W pierwszej i w drugiej części pracy omawiane będą obiekty architektoniczne, które znajdują się na Ziemi, a stworzone zostały w celu badań związanych z przemysłem kosmicznym, z załogowymi lotami kosmicznymi oraz medycyną kosmiczną.

1.2 Załogowa eksploracja przestrzeni kosmicznej - nowa nisza ekologiczna

Skala ludzkiej obecności poza Ziemią jest wciąż na tyle niewielka, iż nie zajmuje znacznego miejsca w świadomości społecznej, posiadając nadal status „nieosiągalnego wyczynu”. W rzeczywistości jednak, od roku 2000 nie było dnia bez ludzkiej obecności na orbicie okołoziemskiej¹. Jest to obecność rotacyjna, wymagająca ciągłego dostarczania zapasów żywności, paliwa, wody, ale jednak nieprzerwana. W roku 2021 został pobity rekord liczby osób przebywających jednocześnie ponad linią Karman’a, czyli umowną granicą kosmosu znajdującą się na wysokości 100 km n.p.m., oraz ilości osób, które w ciągu roku poleciały w kosmos.

¹<https://www.nasa.gov/station20>. Strona NASA poświęcona 20 rocznicy stałego pobytu ludzi w kosmosie z roku 2020. Międzynarodowa Stacja Kosmiczna orbituje 400 km n.p.m. czyli znajduje się na niskiej orbicie okołoziemskiej określaną jako wysokości pomiędzy 200 a 2000 km n.p.m. czyli do pasów radiacyjnych Van Allena. Taki zakres orbit pozwala zminimalizować utratę prędkości pojazdu dzięki znikomej atmosferze oraz równocześnie chronić elektronikę oraz istoty żywe przed promieniowaniem jonizującym ze Słońca oraz promieniowaniem galaktycznym dzięki polu magnetycznym Ziemi. Do końca roku 2021 w kosmosie przebywało ponad 600 osób z czego 29 odbyło lot poza pasy Van Allena (program Apollo).

Pierwsze prace na temat eksploracji kosmosu, autorstwa Konstantyna Ciolkowskiego, powstawały pod koniec XIX wieku. Jego najważniejsza praca nt. technologii raketowych została opublikowana w roku 1903 [1]. W roku 1928 Herman Potočnik przedstawiał w swoich opracowaniach stacje kosmiczne w kształcie torusa wykonującego obroty mające na celu niwelować negatywne efekty braku ciężenia dzięki stałej sile odśrodkowej [2].



Rysunek 1.1: Torus kosmiczny Hermana Potočnika, źródło: [3]

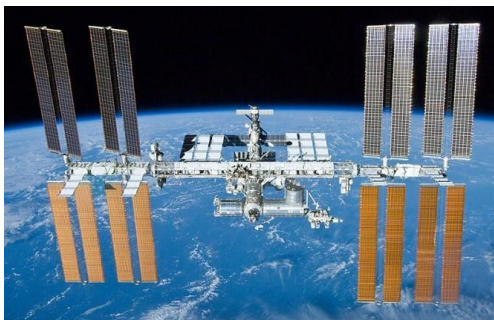
Rok później, fizyk i wizjoner eksploracji kosmosu Hermann Oberth stworzył projekt stacji kosmicznej zaopatrzonej w ogromne lustro o potencjalnym zastosowaniu militarnym (Rys.1.2).



Rysunek 1.2: Stacja kosmiczna Hermana Obertha, źródło: [4]

Oberth i jego uczeń, Wernher von Braun w roku 1944, skonstruowali rakietę V2 mającą techniczne możliwości osiągnięcia granicy kosmosu [5]. Po zakończeniu II Wojny Światowej, Stany Zjednoczone Ameryki i Związek Radziecki starały się przejąć niemiecki program raketowy. Sowieci przejęli pozostałości linii produkcyjnych oraz część personelu. Z obozu Gułag został wypuszczony wybitny inżynier, Sergiej Korolow [6], który nadzorował i koordynował radziecki program kosmiczny. Amerykanie przechwycili zespół inżynierów wraz z Wernherem von Braunem oraz Hermannem Oberthem [7].

W październiku, w 1957 r. Sergiej Korolow umieścił pierwszego sztucznego satelitę na niskiej orbicie okołoziemskiej ². Dla USA osiągnięcie możliwości orbitalnych stało się priorytetem bezpieczeństwa narodowego dlatego też ledwie trzy miesiące później pod koniec stycznia 1958 roku wysłali na orbitę satelitę „Explorer 1”. W roku 1961 Jurii Gagarin został pierwszym człowiekiem w kosmosie. Osiem lat później, w lipcu 1969 roku, na Księżycu wylądowali Neil Armstrong oraz Buzz Aldrin. Panowało przekonanie, że kolonizacja naszego satelity to perspektywa 20-30 lat. Jak wiadomo, nadzieje te okazały złudne. Wyścig kosmiczny dobiegał końca i dalszy rozwój aeronautyki skupił się na niskiej orbicie okołoziemskiej, zdalnych misjach robotycznych oraz rozwoju technologii satelitarnych. Okres ten, chociaż nie tak emocjonujący oraz ambitny jak misje Księżycowe pozwolił na znaczny rozwój wiedzy z dyscyplin nauk o Ziemi, astronomii, fizyki oraz medycyny kosmicznej. Obserwacje Ziemi pozwoliły lepiej zrozumieć klimat planety oraz wpływ człowieka na globalne ocieplenie [8]. Nawigacja oraz komunikacja satelitarna stały się powszechnie dostępną technologią. Stacje kosmiczne, jak MIR oraz ISS, pozwoliły na długoterminowy pobyt ludzi w kosmosie, a co za tym idzie, badania wpływu promieniowania kosmicznego, mikrogravitacji oraz odosobnienia na samopoczucie i zdrowie astronautów (Rys.1.3)



Rysunek 1.3: Międzynarodowa stacja kosmiczna, źródło: [9]

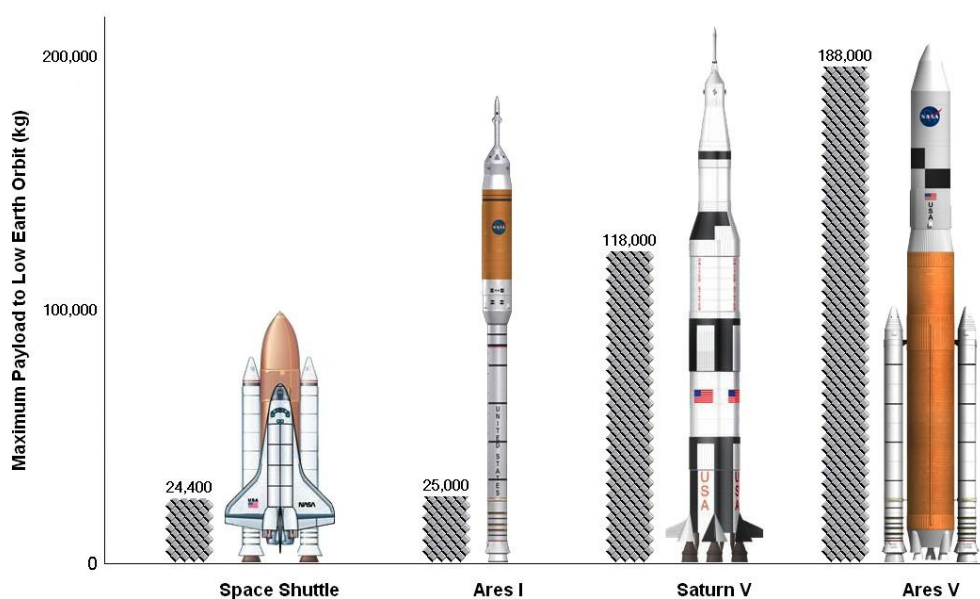


Rysunek 1.4: Moduł *Cupola* Międzynarodowej Stacji Kosmicznej – okno orbitalne, źródło: [10]

²<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=1957-001B>
"Display: Sputnik-1 1957-001B". NASA. 27 Kwietnia 2021. Strona rządowa USA poświęcona pierwszemu sztuczemu satelicie Ziemi.

³<https://www.nasa.gov/press-release/nasa-selects-companies-to-develop-commercial-destinations-in-space> NASA przygotowując się na zakończenie programu ISS ogłosiła program Commercial LEO Destinations dofinansowując trzy projekty kwotą w sumie 415,6 milionów dolarów.

Obecnie można mówić o nowym etapie podboju kosmosu, jakim stała się komercjalizacja załogowych lotów kosmicznych oraz stacji orbitalnych. W roku 2020 po raz pierwszy prywatna kapsuła załogowa „Crew Dragon” firmy SpaceX przetransportowała na międzynarodową stację kosmiczną astronautów. NASA w swojej strategii komercjalizacji niskiej orbity okołoziemskiej dofinansowała budowę załogowych kapsuł firm SpaceX oraz Boeing. Firmy Blue Origin, Nanoracks oraz Northrop Grumman Systems projektują trzy niezależne stacje kosmiczne, które w przyszłości mają świadczyć usługi dla NASA oraz dla klientów prywatnych³. Stworzenie komercyjnej infrastruktury dla załogowych lotów na niską orbitę okołoziemską ma przyczynić się do ustanowienia stałej obecności ludzi na Księżycu⁴. W 2004 roku prezydent George W. Bush wygłosił przemówienie dające początek programowi Constellation. Celami programu miały być powrót na Księżyc, budowa stałej placówki na srebrnym globie oraz, w dalszej perspektywie, załogowa misja na Marsa. Pierwszy lot na Księżyc planowany był na rok 2014 [11]. Program przede wszystkim skupiał się na opracowaniu nowych rakiet nośnych wraz z kapsułą załogową Orion. NASA oraz administracja USA starały się przygotować na odejście ze służby Promów Kosmicznych STS, których rolę ostatecznie przejął program kapsuł komercyjnych.



Rysunek 1.5: Zestawienie możliwości wnoszenia ładunków na niską orbitę Ziemi, źródło: [12]

W roku 2008 wybory prezydenckie w USA wygrał Barack Obama, co spowodowało modyfikację planów. Powstał program SLS – Space Launch System dotyczący budowy serii potężnych rakiet nośnych mających służyć wielu potencjalnym misjom załogowym⁵, w tym misji na Marsa⁶. Program zachował rozwijaną kapsułę załogową Orion projektowaną z myślą o misjach poza niską orbitę Ziemi.

⁴Plany ekspansji poza niską orbitę okołoziemską zazwyczaj wiązały się z rozporządzeniami kolejnych prezydentów USA powołujących się na historyczną przemowę Johna F. Kennedy z roku 1962. 12 września 1962 roku podczas przemowy na Uniwersytecie Rice prezydent John F. Kennedy wygłosił przemowę o narodowym programie kosmicznym, w której zawarł deklarację, że USA wylądują na Księżycu przed rokiem 1970.

Zachowanie w konstrukcji kapsuły Orion było, między innymi, podyktowane znaczącym udziałem Europejskiej Agencji Kosmicznej w projekcie kapsuły, co nadawało przedsięwzięciu charakter projektu międzynarodowego.

W roku 2015 generalny przewodniczący Europejskiej Agencji Kosmicznej Jan Wörner przedstawił ambitny plan proponując utworzenie Moon Village⁷. Nie chodziło w tej koncepcji o konkretną strukturę, czy pojedynczy habitat, ale wizję dla inwestorów, naukowców i narodowych agencji kosmicznych by zaangażować się w eksplorację Księżyca. Było to zaproszenie do międzynarodowej współpracy w obszarze załogowej eksploracji kosmosu znaną z przykładu Międzynarodowej Stacji Kosmicznej (ISS). ISS niedługo przestanie pełnić swoją funkcję, a eksploracja powinna przenieść się na Księżyc, zostawiając niską orbitę Ziemi programom mniejszym oraz prywatnym. Na potrzeby promocyjne Europejska Agencja Kosmiczna (European Space Agency, ESA) podjęła współpracę z firmą architektoniczną *Foster and Partners* tworząc wizję księżycowych zabudowań. ESA planuje budowę nowego laboratorium w Europejskim Centrum Astronautów w Kolonii w postaci hali testowej wypełnionej symulantem regolitu księżycowego z małym testowym modułem habitatu. Placówka będzie się nazywała Luna, a habitat otrzymał nazwę FlexHab (Rys.1.6). Tego samego roku konsorcjum europejskie pracujące wraz z firmą Liquifer kończyło projekt badawczy nad stworzeniem pierwszego prototypu małego habitatu o nazwie SHEE. Projekty te zostaną opisane w kolejnych rozdziałach.

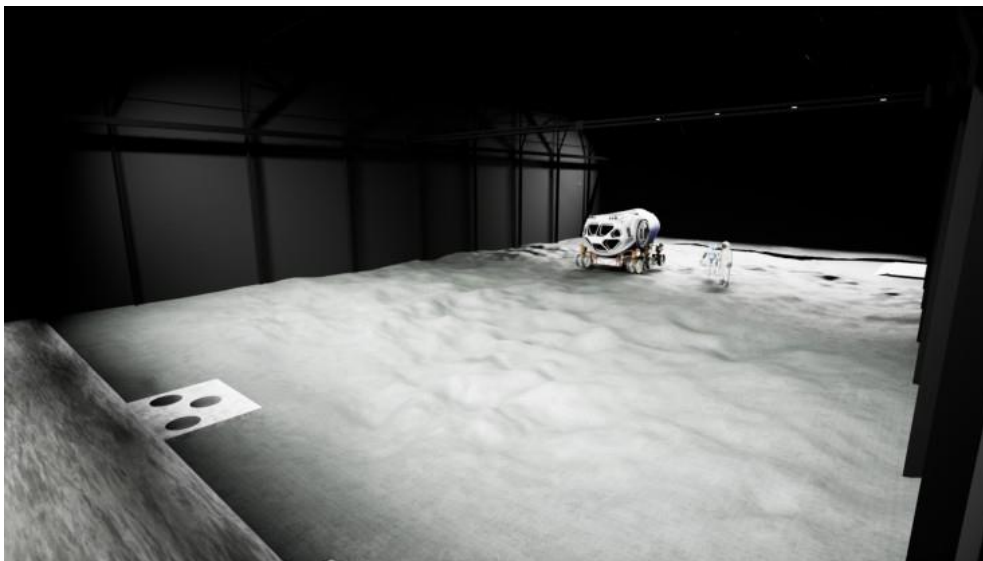
W roku 2017 Donald J. Trump, nowo wybrany prezydent Stanów Zjednoczonych, podpisał Space Policy Directive 1, pierwszą dyrektywę polityki kosmicznej USA, która miała za zadanie usprawnić działania programów NASA⁸. Celem było zebranie wszystkich projektów w jeden spójny program eksploracji Układu Słonecznego ze szczególnym uwzględnieniem Księżyca.

⁵<https://www.nasa.gov/sls> Space Launch System – Kosmiczny system startowy to federalny program USA stworzenia ciężkiej rakiety nośnej, która w założeniu miała pełnić podobną rolę do potężnej rakiety Saturn V z okresu programu Apollo. Program angażuje szereg państwowych firm z branży aeronautyki oraz opiera się częściowo na poprzednich projektach, w tym promie kosmicznego. Projekt był znacznie opóźniony i wymagał dużych pozabudżetowych kosztów. Pierwszy testowy lot planowany był na rok 2022. Konkurencja ze strony tańszych, komercyjnych rakiety, stanowi zagrożenie dla projektu federalnego, który jest jednak kontynuowany ze względów politycznych.

⁶<https://www.nasa.gov/content/nasas-journey-to-mars> – nazwa kampanii marketingowej NASA ukazującej drogę agencji do załogowej misji na Marsa poprzez ciąg różnorodnych misji oraz testów technologii. Według agencji droga na Marsa prowadzi przez misje przechwycenia asteroidy i wysłania tam ludzkiej załogi. Program zmieniono po zmianie administracji federalnej w roku 2018.

⁷https://www.esa.int/About_Us/Ministerial_Council_2016/Moon_Village

⁸<https://www.nasa.gov/press-release/new-space-policy-directive-calls-for-human-expansion-across-solar-system> Dyrektywa ta z jednej strony była podyktowana chęcią odciążenia się nowej administracji od planów Demokratów, a z drugiej podyktowana silną polityką nowej administracji do współrealizacji z rosnącymi geopolitycznymi ambicjami Chińskiej Republiki Ludowej, która zapowiedziała skupienie się na ziemskim satelicie. Zmiana ta była też spójna ze strategią Europejskiej Agencji Kosmicznej, która dalej promowała ideę Moon Village.



Rysunek 1.6: Wizja hali LUNA, źródło: [13]

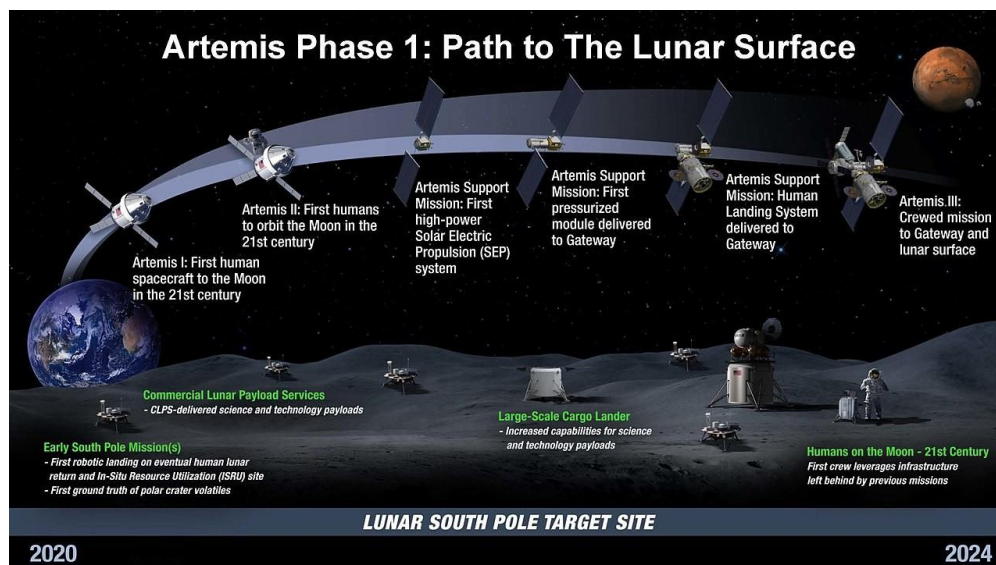


Rysunek 1.7: Moon village, źródło: [14]

W marcu 2019 roku wiceprezydent USA Mike Pence ogłosił efekty prac nad Space Policy Directive 1 w postaci programu Artemis, którego głównym celem jest powrót ludzi na Księżyc do roku 2024⁹. Program opiera się na budowanych raketach SLS, kapsule załogowej Orion oraz na nowej stacji orbitalnej Lunar Gateway. Stacja będzie zlokalizowana na orbicie Księżyca.

Wedle założeń NASA program Artemis ma być początkiem stałej obecności ludzi na Księżycu. Pierwsza misja programu miała się odbyć jesienią 2021 roku, kiedy to pierwszy testowy lot rakiety SLS miał wynieść kapsułę Orion na bezzałogowy lot okrążający Księżyc.

⁹<https://www.space.com/nasa-names-moon-landing-program-artemis.html> Nazwa programu jest nieprzypadkowa, bowiem Artemis w greckiej mitologii jest boginią Księżyca oraz siostrą Apolla. Program zakłada, że podczas pierwszej po 52 latach misji na Księżyc na Srebrnym Globie stanie pierwsza w historii kobieta.



Rysunek 1.8: Koncepcja rozwoju misji programu Artemis, źródło:[15]

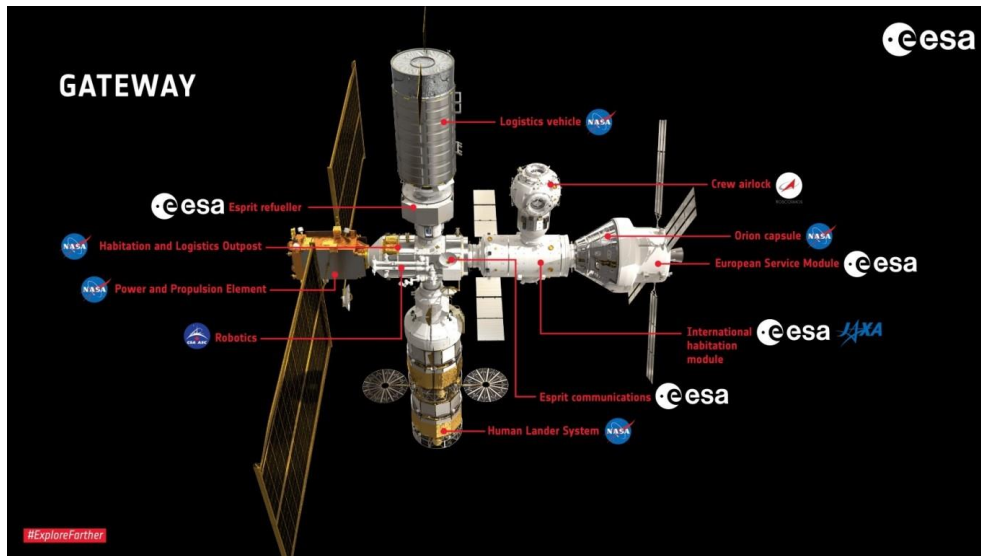
Misja została przełożona na wiosnę 2022. Kolejna misja Artemis II ma mieć podobny przebieg, lecz tym razem będzie to misja załogowa na orbicie Księżyca. Misje będą misjami przygotowującymi infrastrukturę pod lądowanie załogowe, które wedle pierwotnego planu miało się odbyć w roku 2024. Obecnie mówi się o roku 2026 bądź 2028. W tym samym czasie budowana będzie stacja kosmiczna Gateway.

W celu usprawnienia logistyki i wsparcia przyszłego stałego pobytu ludzi na powierzchni Księżyca, jak również przyszłych misji na Marsa zdecydowano o budowie stacji kosmicznej Lunar Gateway¹⁰. Mała stacja kosmiczna będzie orbitowała księżyc po eliptycznej orbicie polarnej mając Ziemię zawsze w kontakcie wzrokowym. W projekt zaangażowane są cztery agencje kosmiczne – NASA, ESA, JAXA oraz CSA. Europejska Agencja Kosmiczna projektuje swój załogowy moduł stacji o nazwie iHAB z firmą Thales–Alenia oraz firmą Liquifer. Wnętrze modułu projektuje dr Barbara Imhof¹¹. Gateway to kolejny element programu, przy którym współpracuje ESA¹². W roku 2021, w celu realizacji programu Artemis, NASA ogłosiła przetarg na projekt lądownika księżycowego, który wygrała firma SpaceX i ich propozycja pojazdu o nazwie Starship¹³.

¹⁰<https://www.nasa.gov/feature/deep-space-gateway-to-open-opportunities-for-distant-destinations> Stacja na orbicie Księżyca w pierwszych latach eksploatacji będzie gościła astronautów jedynie przez jeden miesiąc w roku – pozostały okres będzie obsługiwany zdalnie poprzez ramiona robotyczne znajdujące się wewnątrz oraz na zewnątrz stacji. Gateway ma być miejscem gdzie dokować będzie kapsuła załogowa Orion oraz lądownik Księżycowy w celach logistycznych. W przyszłości Gateway ma również służyć jako stacja do integrowania załogowej misji na Marsa. Roskosmos był również partnerem projektu do momentu rezygnacji i podpisania deklaracji o wspólnej eksploracji Księżyca z CNSA – Chińską Agencją Kosmiczną – stając się stroną rywalizującą w nowym wyścigu kosmicznym.

¹¹architekt, kieruje projektami ESA i EU Framework w obszarze architektury kosmicznej, rozwoju technologii i eksploracji kosmosu

¹²Autor dysertacji miał okazję przeprowadzić rozmowę z jednym z administratorów NASA, Robertem Cabaną, który potwierdził obecność Europejczyków od początku programu Artemis, por. też <https://www.nasa.gov/biographies/associate-administrator-robert-cabana>



Rysunek 1.9: Lunar Gateway, źródło: [16]



Rysunek 1.10: Propozycje Human Lander System, źródło: [17]

Wybór lądownika rozmiarów pojazdu Starship jest szeroko komentowaną decyzją. Starship o średnicy 9 metrów i wysokości 50m jest największym pojazdem kosmicznym w historii. Jego wewnętrzna kubatura przewyższać będzie znacznie Międzynarodową Stację Kosmiczną. Misje Artemis mają wspierać tygodniowe misje na powierzchni Księżyca dla trojga astronautów. Możliwe, że Starship stanie się pierwszą mobilną bazą księżycową. Poziom finansowania wszystkich rozwijanych technologii oraz ich zaawansowanie pozwala żywić nadzieję na sukces obecnych planów, zwłaszcza biorąc pod uwagę znaczny udział rozwiązań komercyjnych. Najbliższa dekada prawdopodobnie zostanie zwieńczona stałą obecnością ludzi na Księżycu. Pierwsze stałe zabudowania na Księżycu zaplanowane są dopiero na połowę lat 30 XXI [18].

¹³<https://www.nasa.gov/press-release/nasa-names-companies-to-develop-human-landers-for-artemis-moon-missions>

W celu stworzenia założeń technologicznych oraz funkcjonalnych projektanci inżynierowie oraz architekci prowadzą badania w dziedzinie zwanej kosmiczną architekturą.

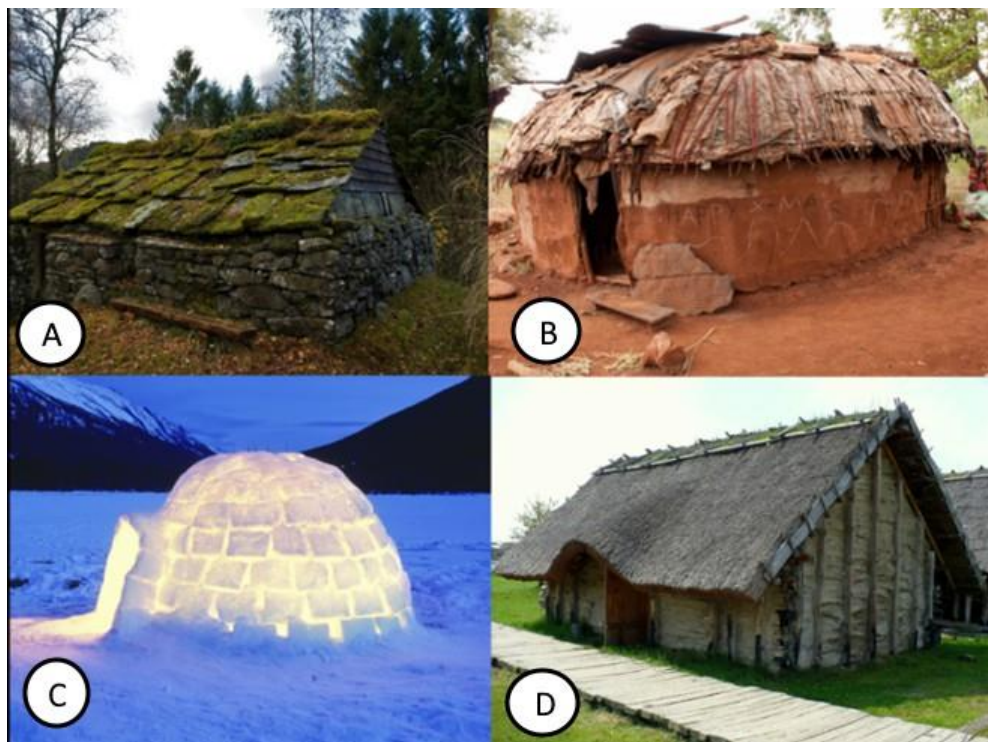
1.3 Architektura kosmiczna nowa gałąź architektury

Zgodnie z teorią architektury wyróżnia się poszczególne jej typy według podziału na podstawowe funkcje: architektura mieszkalna, architektura sakralna, architektura rządowa, architektura rekreacyjna, architektura pożytku publicznego i edukacji, oraz architektura komercyjna i industrialna [19]. Są to typy architektury, które spotykamy w naszym codziennym życiu i zdawać by się mogło, że zawierają kompletny zbiór. Jednak, jeśli spojrzymy na architekturę sprzed tysiącleci to w ramach tej typologii pojawia się nadrzędna funkcja tworzenia budowli: ochrona przed warunkami zewnętrznymi [20]. Dopiero stworzenie siedliska pozwoliło naszym przodkom bezpiecznie zaadaptować nowe nisze ekologiczne znajdujące się poza ich naturalnym habitatem. Według definicji, naturalny habitat to miejsce bądź warunki, w jakich gatunek bądź jego przedstawiciel ma najdogodniejsze warunki do życia¹⁴. Jako gatunek opanowaliśmy technikę rozszerzania naturalnego habitatu poprzez tworzenie schronień z materiałów dostępnych na danym terenie by ochronić się przed siekotą, deszczem, zimnem, wiatrem, czy też drapieżnikami. Budowaliśmy gliniane chaty dające chłód w klimacie gorącym, używaliśmy drewna i kamienia w klimacie umiarkowanym, skór i kości na stepach oraz śniegu na dalekiej północy [Rys.1.11]. Ekspansja do nowych nisz ekologicznych oraz stref klimatycznych następowała dzięki umiejętności tworzenia sztucznych siedlisk chroniących naszych przodków przed różnorodnymi, czasem ekstremalnymi warunkami klimatycznymi. Dopiero po poszerzeniu swojej niszy ekologicznej mieszkańcy mieli okazję wytworzyć na danym terenie pozostałe typy architektury w ramach procesu rozwoju oraz organizacji społeczeństwa [20].

Jeżeli rozważania na temat nowych nisz ekologicznych rozszerzymy o niską orbitę okołozemską oraz najbliższe ciała niebieskie zaczniemy poznawać zagadnienia z zakresu architektury kosmicznej, będącą pochodną architektury ekstremalnej (ICE)¹⁵ tak jak architektura polarna oraz podwodna. Brent Sherwood, który do 2018 roku pracował w NASA Johnson Space Center zdefiniował architekturę kosmiczną jako „teorię oraz praktykę projektowania zamieszkiwanego środowiska w przestrzeni kosmicznej” [21]. Według niego, podejście architektoniczne do projektowania statków kosmicznych oraz habitatów skupia się na inżynierii, w tym inżynierii lotniczej, ale również opiera się na psychologii, fizjologii oraz socjologii. Celem architektury kosmicznej jest stworzenie bezpiecznej przestrzeni do pracy i życia dla astronautów. Zapożycza ona rozwiązania oraz elementy projektowe z ziemskiej architektury:

¹⁴<https://pl.wikipedia.org/wiki/Habitat>, dostęp grudzień 2022

¹⁵ICE - Isolated, Confined, Extreme - izolacja, ograniczona przestrzeń, ekstremalne środowisko - charakterystyczne aspekty związane z architekturą ekstremalną służą naukowcom za opisową nazwę dla tego typu badań, obiektów, czy warunków.



Rysunek 1.11: Historyczne habitaty ludzi: habitaty charakterystyczne dla klimatu umiarkowanego wykonane z drewna i kamienia (A) lub skór (B), igloo charakterystyczne dla dalekiej północy wykonane ze śniegu, (D) chata dająca schronienie przed upałem wykonana z gliny i patyków charakterystyczna dla Afryki, źródło: autor

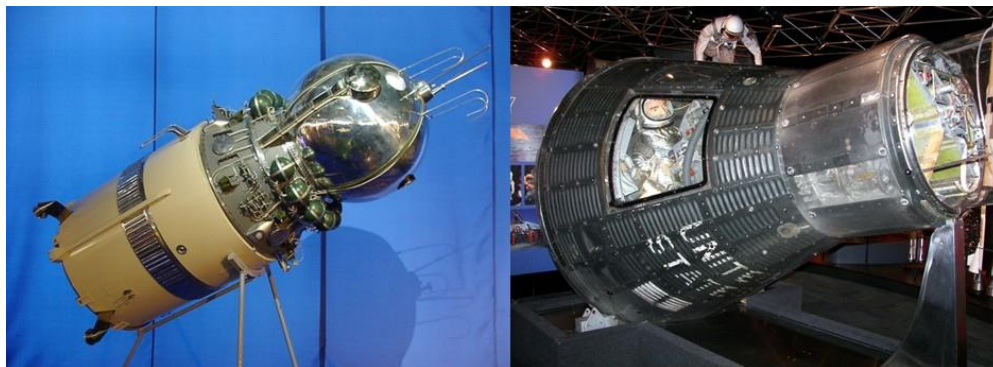
z mikroapartamentów, projektowania pojazdów, hoteli kapsułowych oraz rozwiązań pochodnych. Definicję zaproponowaną przez Sherwooda przyjmuje Międzynarodowe Centrum dla Kosmicznej Architektury przy Uniwersytecie Houston [22]. Jednak oprócz powyższej definicji istnieje jeszcze dodatkowy znaczny kontekst związany z samą kosmiczną niszą ekologiczną – efekt oglądu (ang. overview effect) wpływający na sposób widzenia świata przez osoby, które miały okazję oglądać Ziemię z niskiej orbity okołozemskiej oraz z Księżyca [23]. Efekt oglądu może prowadzić do re-ewaluacji wielu aspektów życia codziennego poprzez spojrzenie na świat z „kosmicznej” perspektywy¹⁶. Na potrzeby tej pracy zastosowano eksperyment myślowy polegający na reinterpretacji gałęzi dyscypliny, jaką jest architektura kosmiczna, w celu przybliżenia odbiorcy perspektywy architektów zajmujących się architekturą kosmiczną. Ziemia znajduje się w średniej odległości 150 mln km od swojej gwiazdy [24], która nieustannie bombarduje planetę promieniowaniem elektromagnetycznym [25] będącym źródłem energii dla większości żyjących stworzeń. Jest to jednak energia większa niż potrzebna, a pole magnetyczne Ziemi [26] chroni przed jej nadmiarem [27]. Ziemia orbituje w tzw. ekosferze Słońca, czyli odległości odpowiedniej dla utrzymania ciekłych rezerwuarów wody [28].

¹⁶Efekt oglądu jest psycho-somatycznym doświadczeniem o charakterze transcendentnym. Astronaucci doświadczający widoku Ziemi jako planety zawieszanej w pustce doznają uczuć opisywanych jako znoszących podziały geopolityczne, etniczne oraz pokazujące zależność człowieka od natury.

W ekosferze Słońca znajdują się jeszcze dwie inne planety – Wenus będąca przykładem jak niszczycielski może być efekt szklarniowy wywołany gazami cieplarnianymi [29] oraz Mars, który będąc trzykrotnie mniejszy od Ziemi nie posiada magnetosfery i padł ofiarą wiatru słonecznego tracąc większość atmosfery [27]. Ziemia znajduje się, więc w odpowiedniej odległości od Słońca i jest dostatecznie duża, by utrzymać swoją atmosferę i ochronić życie przed śmiertelnymi dawkami promieniowania. Obraca się wokół własnej osi, a oś ta jest pochylona względem ekliptyki. Pochylenie skutkuje nierównomierną ekspozycją obu półkul planety na promieniowanie elektromagnetyczne Słońca, tym samym skutkując porami roku [30]. Dodając do tego naszego satelitę – Księżyc – powodującego swoją grawitacją przyciąganie mas wody i pływy oceanów, otrzymujemy skomplikowany system środowiskowy, w którym mogło wyewoluować życie. Życie to stworzyło kulturę wraz z architekturą. Architektura w pierwszej kolejności dostosowana jest do wspomnianych powyżej uwarunkowań, bądź determinantów środowiskowych, a dopiero potem do potrzeb użytkownika niszy ekologicznej. Można w ten sposób zreinterpretować podstawowe elementy budowli: okna to odpowiedź na cykl dobowy, konstrukcja przegród jest odpowiedzią na cykl obiegu naszej planety wokół Słońca przy pochylonej osi obrotu, kominy są wykorzystaniem różnicy ciśnień. Architektura zmienia się wraz z wymaganiami nowego środowiska starając się optymalnie przystosować do celu nadrzędnego – zapewnienia użytkownikowi najdogodniejszych warunków do życia.

Zdaniem autora dysertacji każda architektura jest architekturą kosmiczną, nawet jeśli znajduje się na Ziemi, Ziemia jest częścią kosmosu, a architektura musi odpowiadać na specyficzne warunki, na które została zaprojektowana. Dla przybliżenia kontekstu zagadnienia warto dokonać przeglądu dotychczasowych osiągnięć na polu tej „właściwej” architektury kosmicznej mającej bezpośredni związek z obecną i przyszłą eksploracją kosmosu. Pierwszy załogowy statek kosmiczny został zaprojektowany i zbudowany w Związku Radzieckim pod kierownictwem Sergieja Korolowa [31]. W skład konsorcjum projektowego wchodziły aż 123 organizacje oraz 36 fabryk wytwarzających poszczególne podzespoły. Wynikiem prac był statek kosmiczny posiadający moduł serwisowy oraz moduł załogowy. Odbył on swój dziewiczy lot 15 maja 1960 roku, a 19 sierpnia tego samego roku wyniósł na orbitę psy dla sprawdzenia zachowania się organizmów żywych w czasie lotu. Moduł załogowy mógł pomieścić dwie osoby w skafandrach kosmicznych lub trzy osoby bez skafandrów¹⁷. Projekt Merkury był amerykańskim odpowiednikiem programu Wostok. Rozpoczął się w 1958 roku i trwał do 1963 roku. Projektantem pierwszej amerykańskiej kapsuły załogowej był Maxime Faget pracujący dla NACA (poprzednik NASA) oraz dla firmy McDonnell Aircraft. Faget był konstruktorem pracującym później również nad kapsułami Gemini oraz Apollo [34]. Kapsuła Merkury była zaprojektowana dla jednej osoby w skafandrze kosmicznym. Posiadała system podtrzymywania życia oraz system ratunkowy w postaci małej rakiety na szczycie systemu.

¹⁷Wostok był nie tylko pojazdem, który pozwolił na pierwszy historyczny lot Gagarina. Kolejne wersje kapsuły zawierały również służbę, które umożliwiła odbycie pierwszego w historii EVA (Extravehicular Activity – Aktywność pozapojazdowa), czyli spaceru kosmicznego przez kosmonautę Sergieja Leonowa dnia 18 marca 1965 roku [32]



Rysunek 1.12: Statki Wostok i Merkury, źródło: [33]

Kapsuła była przygotowana do lądowania na powierzchni wody [35]. Pierwszy testowy lot odbył się we wrześniu 1959 roku, czyli kilka miesięcy przed kapsułą Wostok. Kapsuła była o wiele mniejsza, niż pojazd radziecki. By zrównać się z dokonaniem Związku Radzieckiego w zakresie lotów załogowych USA potrzebowały większej, dwuosobowej kapsuły umożliwiającej spacer kosmiczny. NASA ponownie wybrała firmę McDonnell Aircraft oraz Maxima Fageta. Program Gemini trwał od 1961 do 1966 roku. Pierwszy lot załogowy odbył się w roku 1965. Kapsuła mogła pomieścić dwie osoby w skafandrach kosmicznych¹⁸. Druga sowiecka kapsuła załogowa, Sojuz, została stworzona pod koniec 1967 roku przez zakłady Korolowa na potrzeby programu księżycowego¹⁹. Następca kapsuły Wostok jest nadal w użyciu i do roku 2022 odbył ponad 150 lotów. Pierwszy załogowy lot z 1967 roku z kosmonautą Władimirem Komarowem zakończył się śmiercią pilota, który spłonął w atmosferze przy lądowaniu.



Rysunek 1.13: Szczątki Władimira Komarowa, źródło: [36]

Wyjątkowa konstrukcja kapsuły Sojuz była zapowiedzią ważnego trendu w projektowaniu załogowych pojazdów kosmicznych. Kapsuła składała się z trzech modułów o zróżnicowanym przeznaczeniu. Moduł orbitalny z włazem dokującym przeznaczony był do zadań kosmicznych oraz cumowania do innych struktur w kosmosie, moduł lądowania mieścił siedzenia dla trójki członków załogi i jako jedyny powracał na Ziemię. Ostatnim modulem była część serwisowa zawierająca instrumenty oraz systemy zasilania z panelami słonecznymi.

¹⁸Konstrukcja kapsuły Gemini była bardzo prosta. Każdy astronauta miał swój odrębny właz. Na wypadek awarii rakiety włazy mogły zostać odstrzelone, a astronauta katapultowani – jednak tego systemu nie sprawdzono i projektanci mieli do niego zastrzeżenia. Z pokładu tego statku odbył się pierwszy amerykański spacer kosmiczny wykonany przez Eda White'a.

¹⁹www.astronautix.com, dostęp grudzień 2022



Rysunek 1.14: Kapsuła Sojuz, źródło: [37]

Historia kapsuły Sojuz jest pierwszym znanym przypadkiem zaprojektowania wnętrza kapsuły kosmicznej przez architekta. Sergiej Korolow zaprosił do projektu Galinę Balashovą, 33 letnią architektkę projektującą do tej pory budynki biurowe oraz mieszkalne dla zakładu Korolowa. W dalszej swojej karierze odpowiadała również za projekty funkcjonalne przestrzeni użytkowych stacji Salut i MIR oraz promu kosmicznego Buran [38].

Amerykańskim Statkiem kosmicznym mającym realizować głównie cele księżycowego programu Apollo był Command Service Module zaprojektowany przez Maxima Fageta oraz firmę North American Aviation. Projekt rozpoczął się w roku 1961 i zakładał stworzenie modułowego statku składającego się z modułu serwisowego oraz kapsuły załogowej, która wracała na Ziemię [39]. Prototypy były rozwijane przez sześć lat z pierwszym planowanym lotem załogowym zaplanowanym na 27 lutego 1967 roku. Przed lotem dokonywane były testy z załogą misji Apollo 1. Kapsuła miała zostać poddana testowi działając na wewnętrznym zasilaniu. W wyniku powstania iskry kapsuła zapaliła się²⁰ co spowodowało śmierć astronautów [40]. Do roku 1975 w kosmos poleciało dziewiętnaście kapsuł w ramach programu Apollo, programu Skylab oraz programu Apollo-Sojuz Test Project. Lunar Module (LM), czyli Moduł Księżycowy, był drugim elementem misji Apollo. Zaprojektowany został dla dwóch astronautów, którzy mieli oddzielić się od modułu dowodzenia i wylądować na Księżycu. Projektem kierował Thomas Joseph Kelly z Grumman Aircraft [41]. Sześć modułów wylądowało na Księżycu i do dziś jest to jedyny pojazd załogowy, który wylądował gdziekolwiek poza Ziemią²¹.

Prace nad pierwszą stacją orbitalną zaczęły się w Związku Radzieckim na początku lat 60 XXw. w ramach wojskowego programu Almaz. Po sukcesie amerykańskiego programu Apollo Rosjanie zdecydowali się na rozpoczęcie programu stacji kosmicznych. Budowa pierwszej stacji została powierzona następcy zmarłego w roku 1966 Korolowa – Kerimowi Kerimowiczowi [42]. Prace konstrukcyjne rozpoczęły się w roku 1970. W skład zespołu odpowiedzialnego za projekt przestrzeni użytkowych weszła arch. Galina Balashova [38].

²⁰Śmierć ponieśli Gus Grissom – weteran misji Mercury oraz Gemini, Ed White – pierwszy Amerykanin, który dokonał spaceru kosmicznego oraz Roger B. Chaffee, który swój pierwszy lot w kosmos miał odbyć podczas programu Apollo. Grissom oraz White byli typowani na pierwszych ludzi, którzy postawią nogę na Księżycu. Katastrofa opóźniła program Apollo, o co najmniej rok.

²¹Dwanaście modułów Księżycowych poleciało w kosmos – wpierw w testowych lotach na Niską

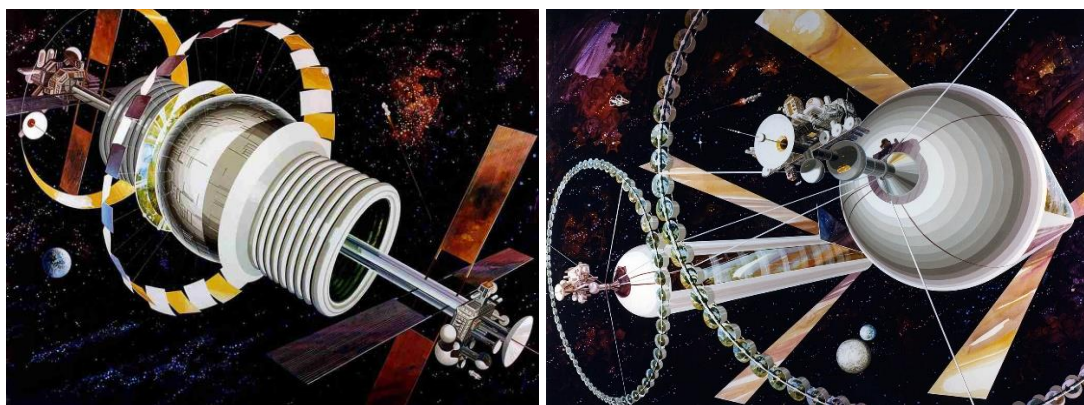
Stacja została wyniesiona na orbitę w 1971 roku – zaledwie po roku prac konstrukcyjnych, czyli jeszcze w okresie lotów misji Apollo. Salut posiadał budowę monolityczną – jeden moduł zawierający wszystkie funkcje naukowe oraz załogowe, do którego dokowała kapsuła Sojuz²². W roku 1977 oraz w roku 1982 na orbitę wyniesiono stacje nowej generacji o nazwach Salut 6 i Salut 7 przeznaczone do dłuższej eksploatacji. Stacja Solut 7 weszła do eksploatacji w 1991 roku [43].

Pierwszą amerykańską stacją orbitalną była stacja Skylab, która została wyniesiona na orbitę 1973 roku. Prace koncepcyjne zaczęły się już w roku 1959 pod kierownictwem Wernhera von Brauna [44]. Projekt stacji zakładał przerobienie wnętrza zbiornika paliwa ostatniego członu rakiety na stację do stałego pobytu ludzi. Prace projektowe nad wnętrzem stacji powierzono firmie Raymond Loewy/William Snaith, która zaproponowała aby skupić się na „zamieszkiwalności” (ang. habitability) i komforcie załogi. Skylab podobnie jak Salut posiadał budowę monolityczną, ale był znacznie większy od stacji ZSRR. Stacja zamiast układu podłużnego posiadała układ pionowy z dwoma poziomami. Jeden poziom był przestrzenią życiową posiadającą jadalnię i kapsuły załogi, poziom naukowy był otwartą przestrzenią, która do dziś jest największą otwarto-przestrzenną kubaturą stacji kosmicznych. Testowano w niej nawet prototypy kosmicznych plecaków manewrowych znanych z ery wahadłowców kosmicznych.

Program wahadłowców kosmicznych oficjalnie znany jako Space Transportation System (STS) rozpoczął się w 1968 roku. Program stał się głównym załogowym programem NASA po zakończeniu programu Apollo w roku 1972²³. Budowa pierwszego wahadłowca zaczęła się w 1974 roku, jako kontrakt dla firmy North American Rockwell. Budowa zakończyła się w roku 1976. Nowy statek kosmiczny nazwano Enterprise i użyto go do testów w atmosferze ziemskiej. Kolejne 5 wahadłowców Columbia, Challenger, Discovery, Atlantis oraz Endeavour od roku 1981 do roku 2011 odbyło w sumie 135 lotów orbitalnych. Przedział załogowy dzielił się na kokpit dowodzenia oraz pokład załogi, gdzie znajdowała się przestrzeń życiowa. Wahadłowiec miał możliwości wynoszenia dużych ładunków dzięki przedziałowi ładunkowemu o długości 16m oraz szerokości 4,6m. Pojazd używano do wynoszenia modułów Międzynarodowej Stacji Kosmicznej, serwisowania teleskopu Hubble’a oraz jako główny środek transportu astronautów, obok rosyjskich kapsuł Sojuz. Dwie katastrofy: Challengera z 1986 roku oraz Columbi z roku 2003 kosztowały życie 14 osób. Po zaprzestaniu używania wahadłowców w roku 2011 USA straciła możliwości wynoszenia załogi na orbitę. W 2019 roku weszła do służby załogowa wersja kapsuły Dragon firmy SpaceX. Projektem bliźniaczym do STS realizowanym przez Związek Radziecki był Projekt Buran, który rozpoczął się w roku 1974. Prace nad sowieckim wahadłowcem prowadził Centralny Instytut Aeronautyczny. W program zaangażowano setki firm z obszaru ówczesnego RWPG. Za projekt wnętrza odpowiadała Galina Balashova. Problemy, głównie natury finansowej spowodowały, że wahadłowiec Buran odbył tylko jeden bezzałogowy lot orbitalny w roku 1988. Kolejne loty oraz testy zaplanowane były na lata 90 XX w. Zmiany geopolityczne doprowadziły do zamknięcia programu w roku 1993 [45].

Projekt stacji MIR został zatwierdzony w roku 1976, jako etap w programie lotów załogowych Związku Radzieckiego i był kontynuowany po rozpadzie ZSRR przez Federację Rosyjską [46]. Była to pierwsza stacja kosmiczna o budowie modułowej. Po raz kolejny za wnętrze stacji odpowiadała Galina Balashova, a projekt nadzorował Valentin Głuszko – ówczesny dyrektor programu kosmicznego ZSRR. Pierwszy tzw. Centralny Moduł został wyniesiony na orbitę w 1986 roku. Kolejne sześć modułów zostało dodanych na przestrzeni kolejnych 10 lat. Modułowy projekt pozwalał na specjalizację poszczególnych segmentów w zakresie wyposażenia laboratoryjnego. Od roku 1995 ostatnie trzy moduły stacji były dostarczane już przez amerykańskie promy kosmiczne, a stacja niejednokrotnie posiadała załogę międzynarodową. W roku 1994 oraz 1995 kosmonauta Valeri Polyakov spędził na orbicie 437 dni i 18 godzin ustanawiając niepokonywany do dziś rekord ciągłego pobytu w kosmosie [47].

W roku 1976 ukazała się książka *The High Frontier: Human Colonies in Space* autorstwa Gerarda K. O’Neill’a [48]. Był to zapis serii warsztatów poświęconych kolonizacji kosmosu zorganizowanych przez Uniwersytet Stanforda w latach 1975–76. Książka zawierała wizję wielkoskalowej kolonizacji przestrzeni pomiędzy Ziemią a Księżycem. Mimo prezentowania futurystycznych scenariuszy opracowanie posiadało naukowe fundamenty i weszło zarówno do kanonów prac o inżynierii kosmicznej jak i o architekturze kosmicznej, ale też do literatury science-fiction. Praca opisywała trzy przykłady megastruktur nazwanych „wyspami”: wyspa pierwsza to kula o średnicy 500 m zwana Sferą Bernal’a, wyspa druga – Torus stanfordzki o średnicy 1,8 km, wyspa trzecia – Cylinder O’Neill’a o średnicy 8 km i długości 32 km.



Rysunek 1.15: z lewej: Sfera Bernala, z prawej: Cylinder O’Neill’a. źródło:[48]

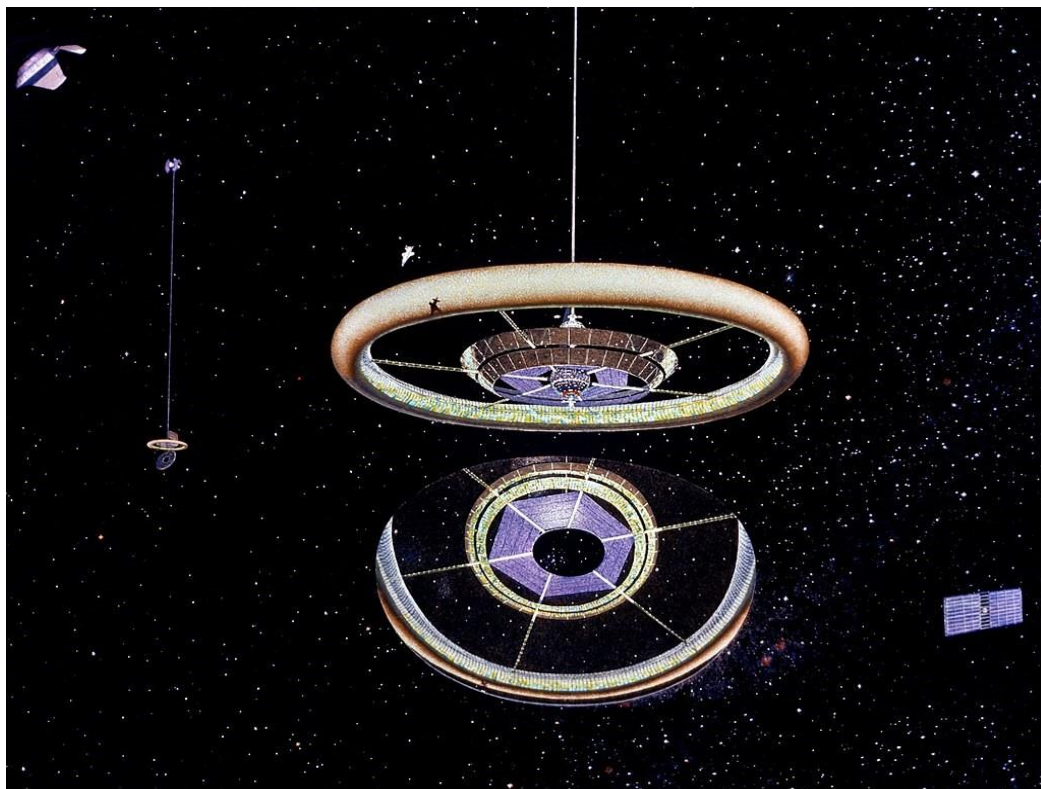
Orbitę Ziemi, potem w locie Apollo 10 dookoła Księżyca został bez załogi uwolniony od statku. Segment lądowika prawdopodobnie rozbił się na Księżycu, moduł załogowy znajduje się na orbicie obiegającej Słońce pozostając jedynym ocalałym modulem księżycowym, który poleciał w kosmos. Reszta po powrocie z powierzchni ziemskiego satelity była porzucana i niszczone przy zderzeniu z Księżycem

²²Na orbitę między rokiem 1971 a 1976 poleciało siedem stacji opartych na tej konstrukcji – wszystkie po wyczerpaniu paliwa spłonęły w atmosferze. Trzy stacje zostały po latach odtajnione, jako obiekty wojskowe z uzbrojeniem przeciwlotniczym na zewnątrz stacji do obrony przed potencjalną próbą przejęcia (Częściowo był to eksperyment naukowy – każdy wystrzał powodował odrzut i wymagał korekcie orbity stacji).

²³[<http://www.spacelaunchreport.com/sts.html>]



Rysunek 1.16: Sfera Bernala, wewnątrz. źródło:[48]



Rysunek 1.17: Torus Stanfordzki. źródło:[48]

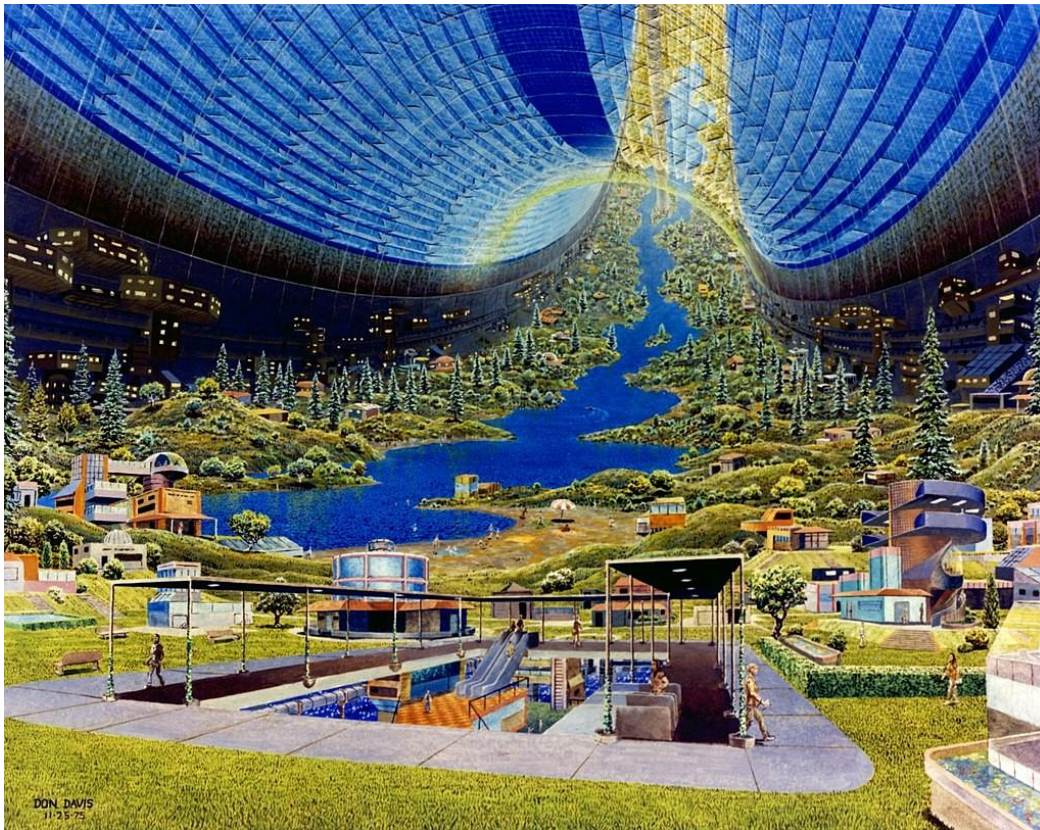
Od czasów stacji MIR załogowe loty kosmiczne skupiały się na przygotowaniu międzynarodowego przedsięwzięcia jakim była Międzynarodowa Stacja Kosmiczna (ISS). ISS jest największym pojazdem stworzonym w historii programu kosmicznego. Jest wynikiem kooperacji pięciu agencji kosmicznych: NASA, Roskosmosu, ESA, JAXA, oraz CSA. Stacja łączy w sobie elementy dwóch projektów: Stacji kosmicznej Freedom zaproponowanej przez NASA w 1984 roku oraz MIR 2 zaproponowanej w 1976 roku [49]. Moduły obu stacji zostały wykorzystane podczas budowy ISS, na którą składa się na ponad 915 m³ użytkowej przestrzeni oraz liczne zewnętrzne elementy uwzględniające panele fotowoltaiczne oraz radiatory. Stacja ma długość 73 m oraz rozpiętość 109 m. Budowa stacji rozpoczęła się w latach 90 XXw. Pierwszym modułem była Rosyjska Zvezda, którą w roku 1998 wyniosła rakieta Proton. Budowa całej stacji rozciągnięta była na 23 lata i wymagała ponad 40 lotów kosmicznych. Najnowszy moduł *Nauka* zadokował do stacji w roku 2021. Stacja składa się z 15 modułów ciśnieniowych i obecnie przebywa tam siedmiu członków załogi. Stacja orbituje na wysokości ok. 420 km i w ciągu doby obiega Ziemię ok. 15 razy. Do dzisiaj na stacji przebywało 112 osób, a uwzględniając wielokrotne wizyty, w sumie stacja gościła 396 osób²⁴. Stacja jest traktowana jako orbitalne laboratorium gdzie odbywają się eksperymenty w mikrograwitacji z zakresu astrobiologii, fizyki, inżynierii materiałowej, pogody kosmicznej, klimatu, badań nad czynnikami ludzkimi, medycyny kosmicznej oraz nauk przyrodniczych.

1.3.1 Kosmiczni architekci

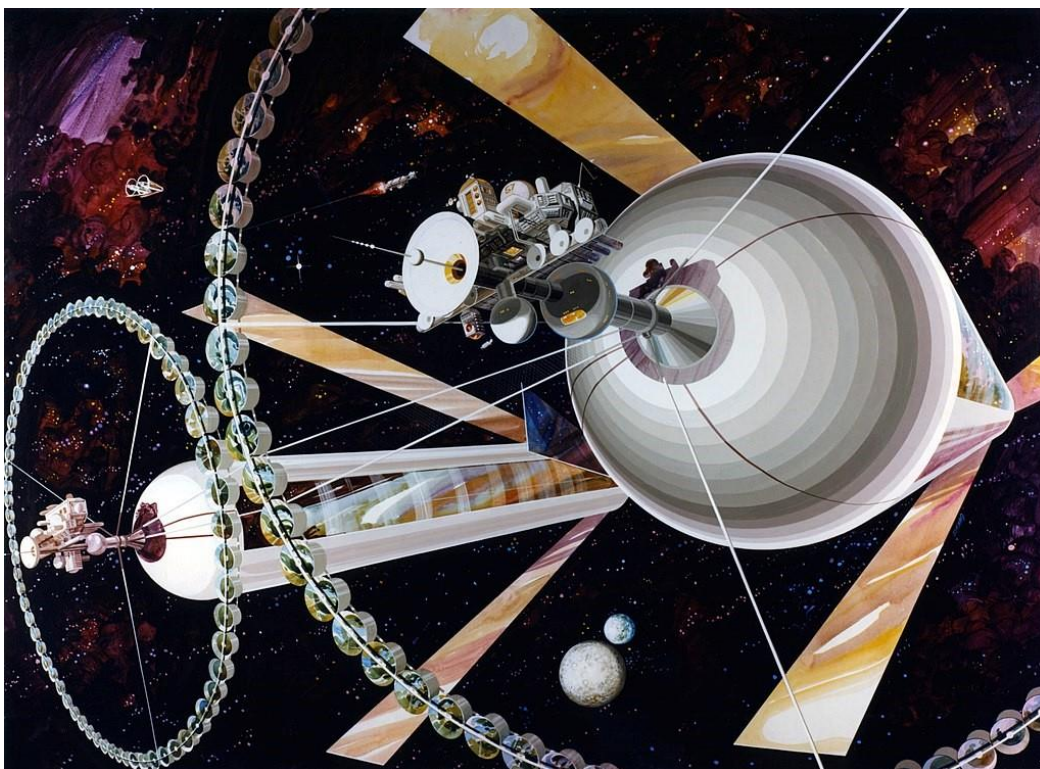
Współcześni kosmiczni architekci mają coraz więcej okazji do badań naukowych oraz do rozwoju nowych przestrzeni życiowych poza Ziemią. Krótko zaprezentowani zostaną dr. Brendt Sherwood, Dr Barbara Imhof, Dr Olga Bannova i Dr Marc M. Cohen, oni bowiem zajmowali na zmianę pozycję przewodniczących Komitetu Technicznego do spraw architektury kosmicznej w Amerykańskim Instytucie Aeronautyki i Astronautyki.

Dr. Brent Sherwood zajmuje się architekturą kosmiczną od 30 lat. Jest praktykiem oraz autorem ponad 50 publikacji, przez 17 lat kierował programem załogowej eksploracji kosmosu oraz zespołami inżyniersko-konceptowymi w firmie Boeing. Od 2005 roku pracował w NASA Jet Propulsion Laboratory, gdzie kierował zespołem tworzącym założenia misji eksploracyjnych w Układzie Słonecznym. Od roku 2018 jest dyrektorem działu rozwoju w firmie aeronautycznej Blue Origin miliardera Jeffa Bezosa. Jest jednym z założycieli Space Architecture Technical Committee (SATC) w ramach AIAA (Amerykańskiego Instytutu Aeronautyki i Astronautyki). W roku 2018 z ramienia firmy Blue Origin Sherwood zaprezentował uaktualnioną wizję Cylindrów O'Neill'a. W roku 2022 Blue Origin otrzymało od NASA 130 mln dolarów na stworzenie stacji kosmicznej Orbital Reef w ramach programu Commercial LEO Destinations (Komersyjnych destynacji na Niskiej Orbicie Ziemi).

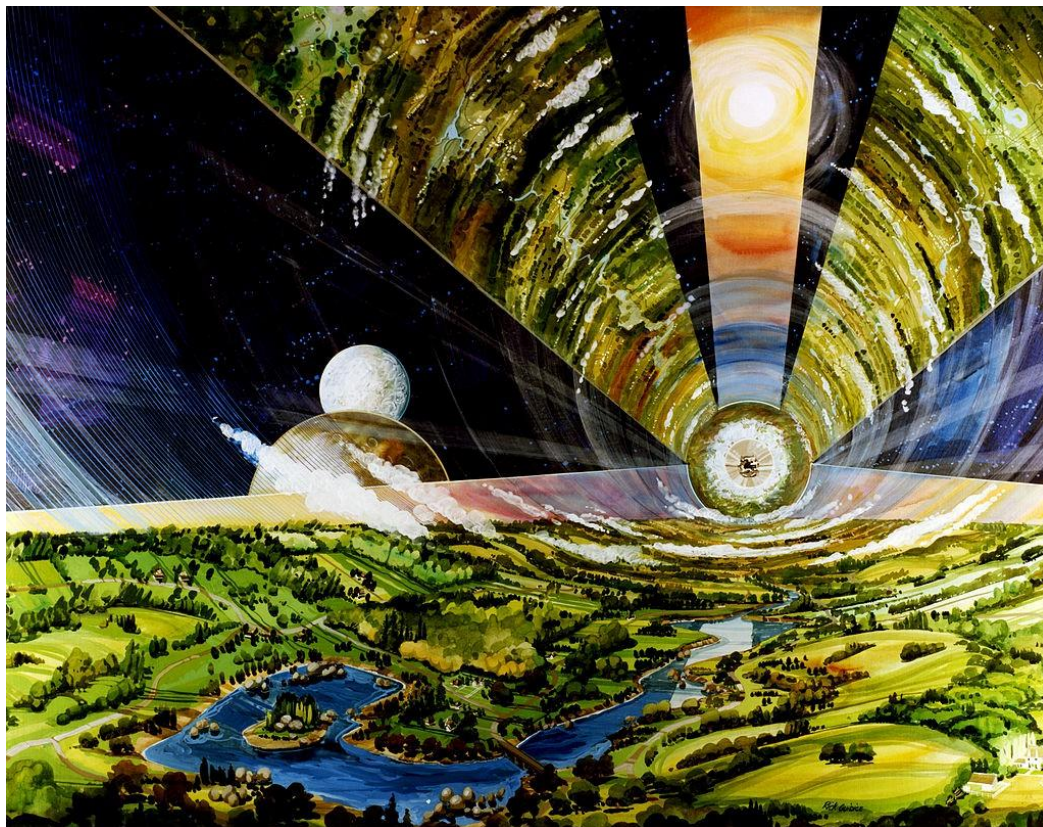
²⁴<https://www.nasa.gov/feature/facts-and-figures>



Rysunek 1.18: Torus Stanfordzki, wewnątrz. źródło:[48]



Rysunek 1.19: Cylinder O'Neill'a, wewnątrz. źródło:[48]



Rysunek 1.20: Cylinder O'Neill'a, wewnątrz, źródło: [48]

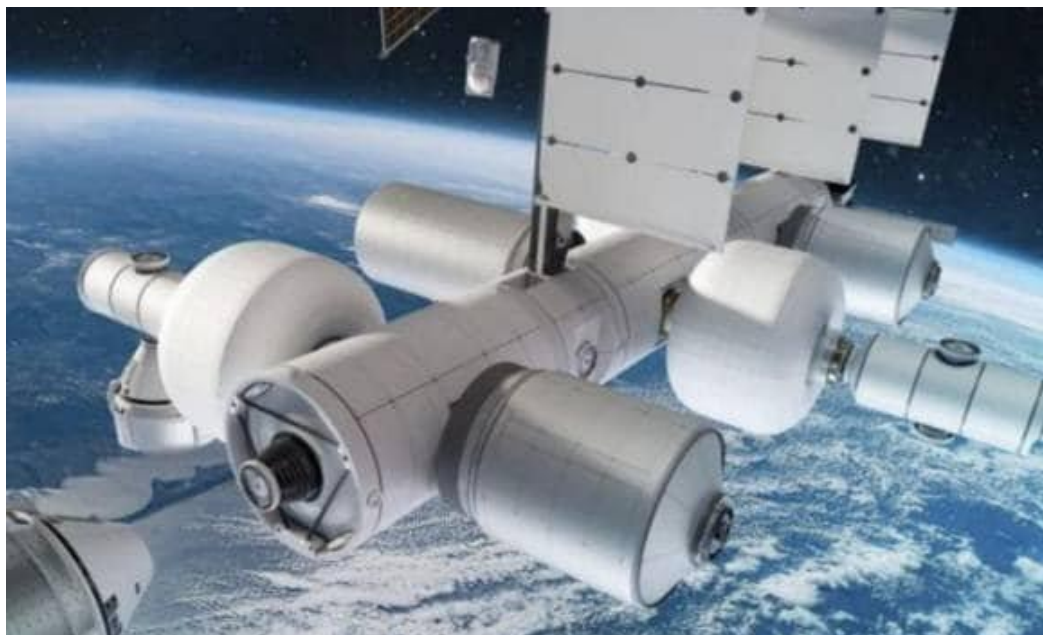
Dr Barbara Imhof jest pionierką kosmicznej architektury w Europie. Jest jedną z założycieli LIQUIFER Systems Group – firmy architektonicznej zajmującej się projektowaniem habitatów kosmicznych oraz ich ziemskich prototypów. Karierę zaczynała w NASA Johnson Space Centre w Houston, a obecnie współpracuje przy projektach NASA i ESA. Wykłada na uczelniach w Wiedniu, Londynie, Los Angeles i Strasburgu. Jest jedną z założycielek Space Architecture Technical Committee (SATC) w ramach AIAA. Barbara Imhof wraz z zespołem stworzyła kilka opisywanych w niniejszej pracy obiektów będących analogowymi habitatami kosmicznymi – habitat SHEE oraz projekt EDEN ISS. Obecnie dr Imhof projektuje wnętrze europejskiego modułu stacji orbitalnej Gateway, która ma zostać wysłana na orbitę Księżyca w roku 2026.

Dr Olga Bannova jest obecnie profesorem na Uniwersytecie Houston, gdzie zarządza Międzynarodowym Centrum dla Kosmicznej Architektury Sasakawa (SICSA). Jest też przewodniczącą Space Architecture Technical Committee (SATC) w ramach AIAA. Tytuł magistra architektury otrzymała w Houston w roku 2001, w roku 2005 obroniła magisterium z architektury kosmicznej na SATC, doktorat w roku 2016 na Uniwersytecie Technicznym Chalmers. Dr. Bannova jest wykładowcą architektury kosmicznej.

Dr Marc M. Cohen jest znanym kosmicznym architektem uważanym za prekursora w tej dziedzinie. Od roku 1979 do 1999 był zatrudniony w NASA i pracował dla wielu zespołów skupiających się na bezzałogowych misjach kosmicznych oraz planowaniu przyszłej eksploracji Marsa. Od roku 1999 do roku 2006 był pracownikiem Departamentu Stanu USA w biurze zaawansowanych technologii kosmicznych. Obecnie jest prezesem firmy Astrotecture. Dr Marc Cohen nazywany jest naczelnym archiwistą kosmicznej architektury. Gromadzi literaturę naukową dla SATC w ramach działalności strony internetowej www.spacearchitect.org.



Rysunek 1.21: Najbardziej znani architekci kosmiczni: górny rząd, od lewej – dr Brent Sherwood, od prawej – dr Barbara Imhof, dolny rząd, od lewej – dr Olga Bananova, od prawej – dr Marc Cohen, [50]



Rysunek 1.22: Orbital Reef, źródło: [51]



Rysunek 1.23: SHEE Habitat, źródło: [52]



Rysunek 1.24: : I-HAB, źródło: [53]

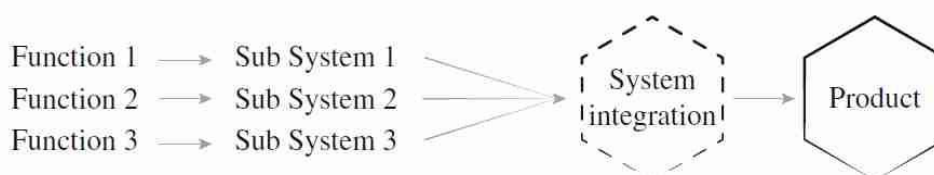
1.3.2 Metoda pracy architekta kosmicznego

Ważnym źródłem wiedzy na temat architektury kosmicznej jest książka Sandry Häuplik-Meusburger i Olgi Bannovej „Space Architecture Education for Engineers and Architects – Designing and Planning Beyond Earth” z 2016 roku [54]. Książka nie tylko przedstawia założenia kosmicznej architektury, ale też pomaga odróżnić podejście projektowe inżynierów i architektów. Omawia programy edukacyjne pokazując projekty zespołów studenckich i podsumowuje dotychczasowe publikacje z zakresu kosmicznej architektury, prezentując różne podejścia do analizy projektów oraz ich oceny. Autorki pierwszą część swojej publikacji poświęcają pytaniu jak pogodzić inżynierię kosmiczną z architekturą, w sytuacji, kiedy praktycy tych dyscyplin mają znacząco odmienne podejście do zagadnień projektowych. Tabela 1.1 prezentuje adaptacje tabeli Branda N. Griffina omawiającą te różnice [54]. Zdaniem Griffina inżynierowie skupiają się na produkcji końcowym, natomiast architekci podczas definiowania problemu skupiają się na procesie projektowym. Podejście projektowe inżynierów jest oparte na konsekwentnym pokonywaniu poszczególnych etapów, co prowadzi do określenia optymalnej w danych warunkach drogi osiągnięcia celu. Podejście architektów jest określane przez Griffina jako „nieliniowe” i skupiające się na krytycznych elementach projektu. Postęp pracy inżynierów może być opisany ilościowo, posiadający początek i koniec, praca architektów ma według autora metodologię jakościową opartą na modelach opracowywanych podczas różnych etapów procesu projektowego. Obie grupy inaczej dochodzą do wniosków projektowych: inżynierowie szukają jednego idealnego rozwiązania, gdzie wszystkie decyzje są kwantyfikowalne, natomiast architekci ufają w istnienie wielu rozwiązań godząc się na to, że tylko niektóre decyzje są kwantyfikowalne.

zadanie	podjęcie inżynierów	podjęcie architektów
problem	zorientowany na produkt	zorientowany na proces
podjęcie	analiza liniowa – start na początku problemu	podjęcie nieliniowe, iteracyjne, skupiające się na zagadnieniach krytycznych
metoda pracy	od początku do końca, każdy etap jest kwantyfikowalny	praca w dowolnym miejscu projektu, zwykle jakościowa, oparta na modelach
rozwiązanie	istnieje jedno optymalne rozwiązanie, podejmowane działania są kwantyfikowalne	prace prowadzą do wielu rozwiązań, tylko niektóre są kwantyfikowalne

Tabela 1.1: Inżynierskie i architektoniczne podjęcia do projektowania, źródło: [54]

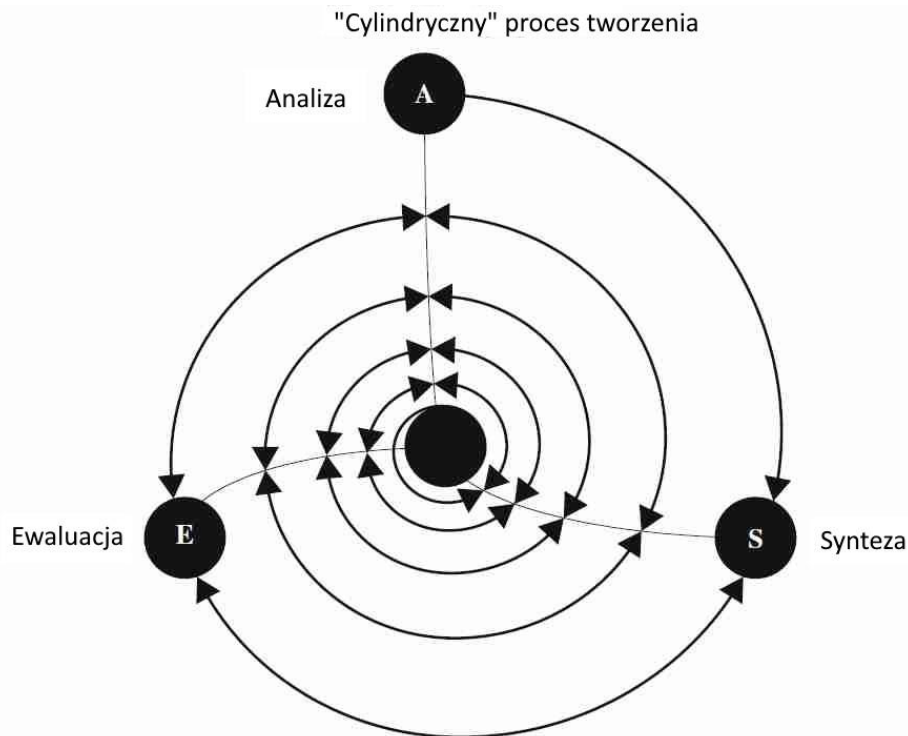
Häuplik–Meusburger i Bannova uzupełniają oryginalną tabelę Branda i Griffina przykładami procesów projektowych obu grup. Ilustruje to rysunek 1.25. Inżynierowie definiując problem zazwyczaj określają zakres funkcji oraz wymagań, które końcowy produkt musi spełnić i na tej podstawie projektują podsystemy, które w ostatniej fazie poddają integracji. Podjęcie zadaniowe pozwala na kwantyfikowalne przydzielenie zasobów oraz osiągnięcie celów. Zdarza się jednak, że po integracji systemów w końcowym produkcie, mimo iż spełnia on wymagania, nie dochodzi do efektu synergii i powstaje rozwiązanie poprawne, lecz nie idealne.



Rysunek 1.25: Przykład inżynierskiego podjęcia projektowego, źródło: [54]

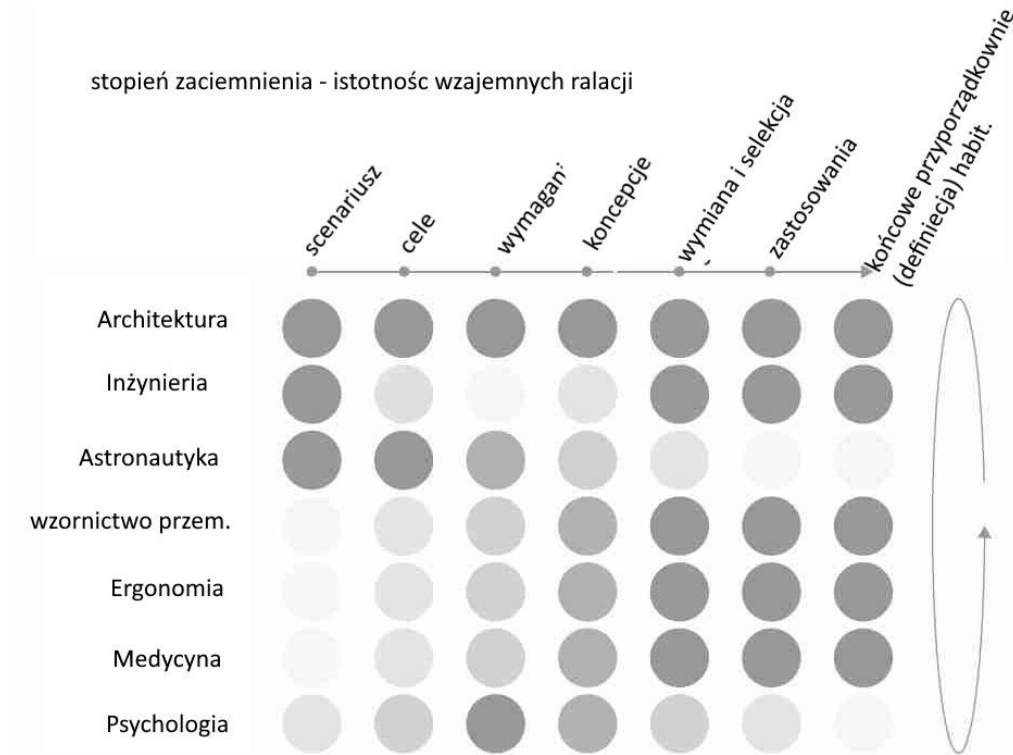
Autorki przeciwstawiają podjęciu inżynierskiemu architektoniczny proces projektowy (Rys. 1.26), który jest cyklicznym procesem analizy, syntezy oraz ewaluacji rozwiązań. Nieliniowe podjęcie ma pozwalać na zmiany oraz integracje koncepcji na każdym etapie projektowym. Wynikiem tego ma być szereg koncepcji i propozycji o różnym stopniu synergii pomiędzy podsystemami i elementami projektu. Inżynieria kosmiczna z racji swoich ograniczeń związanych z logistyką kosmiczną oraz kosztami projektów, historycznie reprezentowała linearne podjęcie projektowe. Analityczne oraz kwantyfikowane podjęcie jest jak najbardziej zasadne, kiedy mowa o bezpieczeństwie, małych marginesach błędów oraz wysokim ryzyku finansowym. W kosmosie wszystko musi zadziałać za pierwszym razem – stąd też maksyma dyrektora lotów NASA Gene Kranz’a z okresu programu Apollo *Failure is not an option* (porażka nie jest jedną z możliwości)²⁵.

²⁵Tak naprawdę, to tekst ten pojawił się w filmie Apollo 13, natomiast Kranz często go używał i nawet wykorzystał jako tytuł biografii



Rysunek 1.26: Cykliczny proces projektowy, źródło: [54]

Podejście to doprowadziło jednak do stagnacji w rozwoju technologii kosmicznych z powodu braku dostatecznej możliwości testowania nowych pomysłów oraz eksperymentowania. W XXI wieku prywatne firmy, takie jak SpaceX, czy RocketLab przyjęły strategię *rapid prototyping* pozwalającą testować nowe rozwiązania w zakresie technologii raketowych poprzez ciągłą ewolucję swoich rozwiązań. Przed architektami coraz częściej angażowanymi w projekty z zakresu załogowych lotów kosmicznych stoi wyzwanie pogodzenia obu procesów projektowych w celu uzyskania najlepszych wyników satysfakcjonujących dla obu światów – inżynierii oraz architektury. W tym celu Häuplik–Meusburger oraz Bannova prezentują schemat relacji dyscyplin w procesie projektowym opartym na syntezie (Rys.1.27). Schemat prezentuje obrazowo zaangażowanie specjalistów z wyszczególnionych dziedzin w proces projektowy habitatu kosmicznego. Wyszczególniono tutaj dziedziny architektury, inżynierii, nauk kosmicznych, projektowania przemysłowego, ergonomii, medycyny oraz psychologii. Wyszczególniono również etapy projektowe jako: scenariusz misji, cele, wymagania, koncepcje, selekcja kompromisowych rozwiązań, implementacje oraz ostateczną definicję habitatu. Warto zauważyć, że architekci przypisali sobie najważniejszą rolę w procesie, dosyć podobnie jak dzieje się to w tradycyjnych ziemskich projektach. Autor dysertacji chciałby podjąć dyskusję nad zawartością tego schematu. Zdaniem autora w schemacie brakuje jednej dziedziny jaką jest zarządzanie projektem, która powinna być włączona na każdym etapie procesu projektowego, a działania architektoniczne powinny osiągnąć pełnię swojego zaangażowania na etapie definiowania wymogów. Możliwe, że autorki publikacji tak właśnie widzą rolę architekta, podobnie do projektów



Rysunek 1.27: Schemat relacji dyscyplin w procesie projektowym opartym na syntezie, źródło: [54]

tradycyjnych – czyli kierownika projektu koordynującego oraz syntezującego pracę wszystkich innych dziedzin. Taki stan rzeczy jednak nie współgra z historycznymi projektami i planami załogowej eksploracji kosmosu. Zgodnie z poznanymi już elementami architektury misji wiadomym jest, że określenie scenariuszy, kierunków eksploracji oraz celów naukowych odbywa się na etapie poprzedzającym projektowanie inżynierskie, w tym architekturę. Ten pierwszy etap z reguły zawdzięcza się specjalistom z dziedziny aeronautyki, nauk kosmicznych oraz inżynierii. Na kolejnym etapie przychodzi definiowanie wymogów i ograniczeń związanych z technologią i dostosowanie celów oraz scenariuszy do możliwości technologicznych oraz logistyki kosmicznej. Prace projektowe nad potencjalnym habitatem kosmicznym mogą pojawić się najwcześniej na tym etapie i dzięki iteracyjnemu podejściu architekci w istocie zostają zaangażowani w redefinicję scenariuszy oraz celów. Oznacza to jednak, że istnieje kilka iteracji określających cele oraz scenariusze, kiedy architekt nie jest wymagany w pracach i zazwyczaj nie jest obecny. Ważny natomiast jest manager projektu, który mógłby podążać za iteracyjnym procesem projektowym opartym na syntezie. Powyższy diagram odnosi się do procesu projektowego samego habitatu, kiedy to architekci obecni są od samego początku – nie zmienia to faktu, że stają oni już przed ogólnie zdefiniowanym problemem w ramach którego mogą prowadzić iteracyjny proces projektowy. Rozdzielając role architekta oraz kierownika projektu otrzymalibyśmy prawdziwszy obraz sytuacji, gdzie architekt mógłby pełnić rolę również kierownika projektu w ramach ogólniejszych scenariuszy oraz wymagań wynikających z koncepcji architektury misji.

1.4 Analogowe symulacje misji oraz analogowe habitaty kosmiczne (AHK) – naukowe podejście do przygotowania się do życia poza Ziemią

Analogowe symulacje misji do badań nad zagadnieniami załogowych lotów kosmicznych organizowane są od końca lat 60 XX w. Polegają na testowaniu oraz badaniu niektórych aspektów misji kosmicznych bez potrzeby lotu w kosmos. Jest to jeden z głównych celów badań w habitatach analogowych. NASA prowadzi kilka programów badań analogowych związanych z powrotem na Księżyc oraz misjami na Marsa od roku 1998. Wśród specjalistów nie ma zgody co do ścisłej definicji „analogowej symulacji misji”, podobny problem dotyczy „analogowych habitatów kosmicznych”. Pierwsza struktura tego typu dedykowana symulacjom marsjańskim powstała w roku 2001, ale jeszcze przed jej powstaniem agencje kosmiczne oraz badacze korzystali z analogicznych warunków, jakie tworzą dla użytkowników stacje arktyczne oraz podwodne. Wcześniej jeszcze pojawiały się też badania nad zamkniętymi ekosystemami, które obecnie również należy wpisać w nurt analogowych habitatów kosmicznych. Brak spójnej definicji oraz kategoryzacji oceny takich placówek prowadzi do nieporozumień.

Publikacja zespołu Europejskiej Agencji Kosmicznej [55], prezentowała listę istniejących oraz planowanych habitatów analogowych. Praca analizowała obiekty w trzech kategoriach: zastosowanych technologii, typologii oraz charakterystyki rozwiązań. Praca niezwykle pobieżnie traktuje te kategorie. Określenie zastosowanych rozwiązań technologicznych sprowadza się do określenia czy użyte rozwiązania mają charakter ‘spin-in’ lub ‘spin-off’ (patrz rozdz. 4.2.7) bez opisów oraz analiz. Zaproponowana typologia sprowadzała się do określenia czy habitat jest placówką wewnętrzną, zewnętrzną korzystającą z analogicznej lokalizacji, bądź hybrydą obu typów. Charakterystyka rozwiązań skupiała się na trzech elementach: systemach podtrzymywania życia, produkcji żywności oraz izolacji załogi. Lista rozpatrywanych habitatów zawierała 14 pozycji istniejących instalacji oraz 11 pozycji planowanych realizacji. Dobór obiektów w niektórych przypadkach wydaje się bardzo dyskusyjny. Na liście istniejących obiektów znalazły się niezwiązane z przemysłem kosmicznym realizacje architektury ekologicznej (earthship), jak i instalacje badawcze do badań nad zamkniętymi ekosystemami niepołączone z habitatem analogowym i nieprowadzące działań analogowych. Brakuje też kilku istniejących już wtedy habitatów analogowych. Na liście przyszłych realizacji znalazły się jedynie 3 obiekty, które już zostały zbudowane bądź rzeczywiście będą realizowane w późniejszych latach. Mowa tutaj o instalacji LUNA, EDEN ISS oraz polskim M.A.R.S. będącym prototypem LunAres Research Station. Zestawienie przedstawione na schemacie/rysunku 1.28 jest zaczerpnięte ze wspomnianej pracy.

W literaturze można odszukać opracowania opisujące konkretne projekty analogowych habitatów kosmicznych i opisy te posłużą do analiz w kolejnym rozdziale. Opracowania przeglądowe analizujące podobieństwa oraz potencjał naukowy tych placówek są bardzo nieliczne.

Spin-in(i), Spin-off(o)	analogi zewnętrzne	habitaty hybrydowe	zewnętrzne analogi	nazwa	bud. Komórkowa	produkcja żywności	izolacja ludzi
Przeszłość i czas obecny							
i/o				CELLS	x		
	x			BIOS-3	x	x	x
o		x		CESRF	x		
o	x			BIOSPHERE2	x	x	x
o		x		MELISSA	x		
o		x	x	MARS 500			x
o		x		MDRS	x		x
o				FMARS	x		x
o		x	x	HI-SEAS			x
o		x		HERA			x
i		x		ECO-hause	x	x	
i		x		MACHINE	x	x	
i		x		CLEAN LIVIN'	x	x	
i		x		EARTYSHIP th	x	x	
Przyszłość							
i/o		x		EXO HAB1	x		
i/o		x		HOPES	x		
o		x		EURO-M.A.R.S	x		x
i/o		x		GREEN P.	x		
o		x		MARS M.		x	x
o		x		HEXHAB	x	x	x
o		x		M.A.R.S	x	x	x
i/o		x		MOON INFLATABLE			x
i/o		x		LUNA	x		x
i/o	x			FLaSH INITIATIVE	x	x	x
i/o		x		EDEN	x	x	x

Rysunek 1.28: Porównanie istniejących i planowanych habitatów analogowych, źródło: [55]

2 Cel pracy

2.1 Przyczyny podjęcia tematu

Autor podjął się próby określenia determinant w kształtowaniu formy i funkcji analogowych habitatów kosmicznych z przyczyn zawodowych oraz osobistej pasji dla tego tematu. W ramach swojej zawodowej praktyki projektowej autor realizuje przy współpracy z agencjami kosmicznymi laboratoria kosmiczne, symulatory oraz habitaty badawcze będące zasadniczym przedmiotem tej dysertacji. Pracując nad zagadnieniami związanymi z architekturą kosmiczną autor zetknął się z szeregiem determinantów jakie architektura pozaziemska musi spełniać, a które bezpośrednio wpływają na formy analogowych habitatów kosmicznych. W literaturze dotyczącej tego zagadnienia, autor odnalazł kilka sposobów klasyfikacji architektury kosmicznej, nie odnalazł jednak typologii oraz topologii dla jej prototypów. W rozumieniu autora oznacza to brak usystematyzowania wiedzy co utrudnia określenie stanu badań oraz uniemożliwia stworzenie optymalnej strategii rozwoju dla tego typu architektury bądź nurtu badań. Decydującą przyczyną podjęcia tematu jest chęć usystematyzowania wiedzy na temat analogowych habitatów kosmicznych. Nie istnieją, lub nie są autorowi znane analizy funkcjonalne, przestrzenne oraz strategie rozwoju habitatów badawczych. Stan ten był jednym z głównych powodów rozpoczęcia prac nad zagadnieniem będącym tematem rozprawy. W kolejnych rozdziałach przedstawiono historię działań, definicje oraz realizacje, w celu uporządkowania wiedzy we wspomnianym zakresie.

2.2 Tezy pracy

Autor, w oparciu o wstępną analizę tematu formułuje dwie poniższe tezy, które zostaną zweryfikowane w dalszej części rozprawy.

- Obecny stan wiedzy i dostępna literatura pozwalają na określenie determinant w kształtowaniu formy analogowych habitatów kosmicznych.
- Analiza formy i funkcji analogowych habitatów kosmicznych w oparciu o determinanty umożliwi stworzenie typologii analogowych habitatów kosmicznych.

2.3 Pytania badawcze

Uporządkowanie i usystematyzowanie rozproszonej w literaturze wiedzy jest bardzo ważnym zadaniem i często pozostaje jedynym wymiernym efektem podjętych prac. Jednak samo wprowadzenie porządku nie stanowi o tzw. „wartości dodanej”. Aby podjęta praca przyniosła określone rezultaty muszą zostać postawione konkretne pytania, zaś praca powinna zmierzać do próby udzielenia jasnej odpowiedzi. Nagromadzenie i usystematyzowanie wiedzy na temat analogowych habitatów kosmicznych zrodziło problem badawczy prowadzący do następujących pytań badawczych:

Co to jest analogowa symulacja misji oraz analogowy habitat kosmiczny (AHK)?

1. Jaką rolę pełnią AHK w badaniach nad załogową eksploracją kosmosu?
2. Jakie powinny być kryteria oceny AHK?
3. Jaki wpływ mają założenia naukowe, technologiczne i operacyjne na formę i funkcję AHK?
4. Jakie można wyróżnić zastosowane systemy konstrukcyjne i ich wpływ na formę i funkcję AHK?
5. Czy na podstawie analiz da się przewidzieć kierunki rozwoju AHK?

2.4 Zakres pracy

Zakres pracy obejmuje dokonania narodowych oraz międzynarodowych agencji kosmicznych pozwalające przeanalizować zagadnienia jakimi są analogowe symulacje misji. Oprócz opracowań wypomnianych instytucji znajdują się również opracowania akademickie oraz rezultaty niezależnych programów badań analogowych. To samo tyczy się wyselekcjonowanych obiektów do analiz formy oraz funkcji. Z uwagi na fakt, iż analogowe habitaty kosmiczne służą celom naukowym, często są obiektami, na temat których istnieją opracowania naukowe. W pracy przeanalizowane zostanie 26 obiektów co stanowić będzie najobszerniejsze dotychczasowe opracowanie na temat tego typu obiektów.

W pracy znajdują się wyłącznie opracowania na temat działań oraz obiektów, dla których są dostępne należyte opracowania naukowe. Analizowana literatura przedmiotu została podzielona na cztery zakresy czasowe. Pierwszy, obejmuje podstawy aeronautyki i prace Konstantyna Ciołkowskiego [1], Hermanna Oberth'a[56] oraz Hermana Potocnik'a [2], kończy się natomiast na najnowszych planach załogowych misji kosmicznych na Księżyc i na Marsa aż do lat 30 XXI wieku. Jest to zarys pełnego okresu tzw. ery kosmicznej uwzględniający plany nakreślone dla przyszłej dekady pozwalający przedstawić kontekst przedmiotu dysertacji i umiejscowić tematykę w szerszym rozumianym przemyśle kosmicznym. Dwa kolejne zakresy dotyczą badań literaturowych na temat przedmiotu dysertacji. Zostały podzielone na dwa okresy: od lat 50 XX wieku do roku 1991 oraz po roku 1991. Podział wynika ze zmiany podejścia do działań analogowych po roku 1991, kiedy to opracowano nową strategię załogowej misji na Marsa. Zaowocowała ona powstaniem w roku 2000 pierwszego dedykowanego analogowego habitatu kosmicznego do prowadzenia działań analogowych. Przed rokiem 1991 działania analogowe prowadzono podczas innych wypraw oraz ekspedycji, niezwiązanych bezpośrednio z lotami kosmicznymi (przez dosłowną analogię).

Ostatnim zakresem czasowym jest ten zastosowany dla analizowanych przykładów architektury. Analogowe habitaty kosmiczne głównie powstawały pomiędzy rokiem 2000 a rokiem 2022 i właśnie te habitaty są analizowane pod kątem formy oraz funkcji. Uwzględniono jednak także pojedyncze przykłady starszych instalacji, które po spełnieniu swojej pierwotnej roli zostały zaadaptowane do symulacji załogowych lotów kosmicznych.

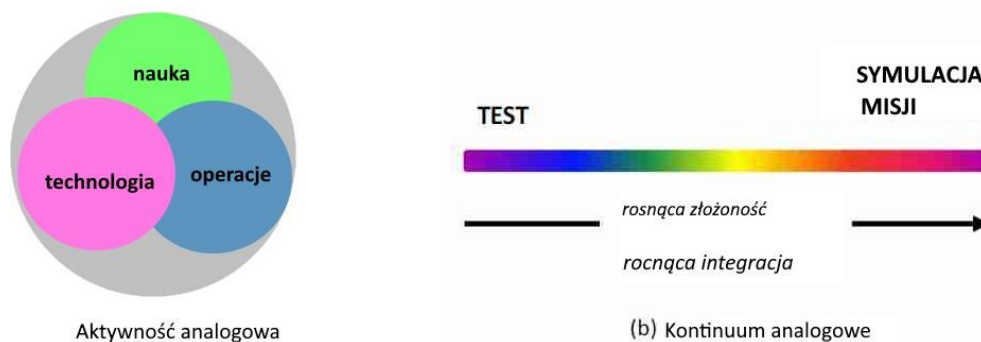
3 Analogowe symulacje misji – stan badań

3.1 Analogowe Symulacje Misji oraz analogowe habitaty kosmiczne

W roku 2015 został opublikowany załącznik do dokumentu NASA, *Mars Reference Mission 5.0*, który przybliżał niektóre założenia uczynione w odniesieniu do elementów przewidzianych do instalacji na powierzchni Marsa podczas misji załogowej, w tym habitatów kosmicznych [57]. We wspomnianym dokumencie pojawiły się również opisy misji oraz instalacji analogowych, jako testerów różnych aspektów przyszłej architektury kosmicznej¹. Autorzy opisali, jakie znaczenie mają badania analogowe dla prawdziwych misji kosmicznych oraz nakreślili kierunki badań w ramach tych działań. Wizualizują zakres tych działań w formie diagramu, Rys.(3.1) podkreślając, że na aktywności analogowe składają się głównie, ale nie wyłącznie, aktywności związane z zagadnieniami naukowymi, technologicznymi oraz operacyjnymi.

Pojawia się również próba stworzenia definicji różnych aspektów związanych z tego aktywnościami analogowymi. Autorzy wyróżniają analogowe symulacje misji, testy analogowe, analogowe lokalizacje, analogowe placówki oraz placówki testowe. Definiują te pojęcia następująco:

¹Hoffman [57] pozwala umiejscowić analogowe habitaty kosmiczne oraz misje analogowe w ogólnie rozumianym programie badawczym oraz określić ich znaczenie: *Ludzkość nigdy jeszcze nie brała udziału w załogowych misjach kosmicznych na taką skalę, jaką przedstawia wizja raportu. Najlepszymi dotychczasowymi analogiami misji kosmicznych są prawdopodobnie misje arktyczne oraz ekspedycje podwodne. Mimo iż te ziemskie analogie nie są doskonałe, to są w stanie dostarczyć informacji na temat specyficznych warunków eksploracji kosmicznej, na przykład zmianę cyklu dobowego, ograniczenia telekomunikacje, brak żywych stworzeń, konieczność samowystarczalności oraz izolacja, która wpływa na zachowanie grupy, oraz jej wydajność podczas kosmicznych misji eksploracyjnych. Wykorzystanie podobnych środowisk oraz wyspecjalizowanych placówek symulacyjnych i testowych, w połączeniu z danymi zebranymi na ISS (International Space Station), pomoże stworzyć odpowiednie strategie wspierające coraz bardziej skomplikowane i wymagające misje na Marsa. Architektura statku kosmicznego oraz jego zagospodarowanie są szczególnie ważne biorąc pod uwagę wpływ na aspekty psychologiczne, socjalne, bodźcowe oraz behawioralne wpływające na wydajność załogi, produktywność oraz jej bezpieczeństwo. Dobór składu załogi powinien się opierać na personalnych oraz interpersonalnych charakterystykach, które promują bezkonfliktowe oraz produktywne grupy, jak również na zestawie umiejętności wymaganych do wykonywania skomplikowanych operacji. Skład załogi, trening oraz dobór odpowiednich kompetencji powinny być prowadzone w planetarnych laboratoriach, symulatorach oraz analogowych placówkach testowych. (tłumaczenie autora)*



Rysunek 3.1: Aktywności analogowe i kontinuum analogowe, źródło: [57]

- *Analogowa symulacja misji* jest aktywnością zaprojektowaną by odwzorować określone naukowe, techniczne oraz operacyjne aspekty przyszłych misji kosmicznych używając prawdziwych albo funkcjonalnie reprezentatywnych systemów, działań czy procedur w analogicznych warunkach środowiskowych, w celu zrozumienia wydajności oraz interakcji pomiędzy tymi systemami, działaniami oraz procedurami, jak również ich możliwości w zakresie osiągnięcia celów misji.
- *Test analogowy* to eksperyment zaprojektowany w celu zbadania bądź dopracowania pojedynczego naukowego, technicznego albo operacyjnego wymogu misji bądź pożądanej danej.
- *Analogowa lokalizacja* jest naturalną lokalizacją na Ziemi posiadającą pewne podobieństwa (tzn. klimatyczne, geologiczne, morfologiczne ect.) z przyszłą misją kosmiczną
- *Placówka analogowa* to sztuczna struktura albo lokalizacja, gdzie warunki są podobne do tych, jakie będą panowały w przyszłej misji kosmicznej, są one powtarzalne oraz częściowo kontrolowalne.
- *Placówka testowa* jest sztuczną strukturą, w której parametry środowiskowe odpowiadają tym napotkanym podczas konkretnej fazy misji kosmicznej, są kontrolowalne oraz powtarzalne

Definicje określają istotę badań analogowych, analogowych symulacji misji, misji analogowych, analogowych lokalizacji i analogowych habitatów kosmicznych nazywanych krótko habitatami analogowymi. Pewnego komentarza wymaga terminologia i rozumienie określeń analogowy oraz analogiczny. W języku angielskim zamiennie używane są określenia „analog” oraz „analogous”, natomiast w polskiej terminologii stosuje się wspomniane określenia analogowy i analogiczny. W niniejszej rozprawie autor będzie używał określenia „analogowy” w odniesieniu do rzeczy, konstrukcji, instalacji naśladujących pewien obiekt, natomiast „analogiczny” będzie dotyczyło zaistniałej sytuacji lub działań. „Analogicznym” testem, misją czy też placówką można, więc nazwać działania oraz testy przeprowadzane podczas działań w analogicznych warunkach, jak arktyczne, podwodne lub geologiczne ekspedycje naukowe, podczas których można badać również zagadnienia związane z załogowymi misjami kosmicznymi.

Analogiczne działania zostały stworzone na potrzeby odmiennych celów naukowych, niż załogowe loty kosmiczne, ale można je potraktować, jako analogie oraz okazję do przeprowadzenia testów analogowych. Nie są one symulacją misji kosmicznej. Analogiczną lokalizacją nazwiemy, również ziemskie środowisko pozwalające na badanie pewnych elementów związanych z celami załogowej misji kosmicznej. To samo tyczy się używanej technologii, która będąc jeszcze niedostępna często zastępowana jest przez jej analogiczne ziemskie odpowiedniki.

Terminem, który również warto wyjaśnić w kontekście prowadzonych analiz jest „symulacja”. Jest on tutaj rozumiany jako sztuczne odtwarzanie właściwości danego obiektu lub zjawiska za pomocą jego modelu, jak również kalkulacja planowanych efektów. Symulacja analogowa misji jest najbardziej skomplikowaną aktywnością analogową pozwalającą przeprowadzić dużą liczbę testów analogowych naraz w ramach jednej kampanii naukowej. Analogowe symulacje misji mają różny charakter – mogą to być kampanie terenowe niewymagające analogowej placówki bądź placówki testowej zorganizowane w ramach testowania sprzętu oraz treningu załogi w terenie, jak również analogiczne ekspedycje badawcze, podczas których można wykonać testy analogowe związane z celami misji, bądź symulacje załogowych misji kosmicznych w dedykowanych placówkach testowych oraz analogowych.

Definicje różnych aspektów związanych z aktywnościami analogowymi, które podano wyżej, są dziełem Hoffmann’a oraz Lové’a [57]. Dobrze oddają one istotę działań analogowych, jednak na potrzeby niniejszej pracy postanowiono uściślić niektóre z nich w kontekście wykonanych badań literaturowych, a również dodać definicję analogowego habitatu kosmicznego, który to termin lepiej opisuje ogół struktur używanych do działań analogowych. Dodatkowo postanowiono rozróżnić placówki analogiczne oraz analogowe w oparciu o cel i charakter powstania placówki. Definicje w ujęciu autorskim zaprezentowane są poniżej razem z uzasadnieniem wprowadzonych zmian.

- *Analogowa symulacja misji* jest aktywnością zaprojektowaną by odwzorować określone naukowe, techniczne oraz operacyjne aspekty przyszłych misji kosmicznych za pomocą prawdziwych albo funkcjonalnie reprezentatywnych systemów, działań czy procedur w analogicznych warunkach środowiskowych, w celu zrozumienia wydajności oraz interakcji pomiędzy tymi systemami, działaniami oraz procedurami, jak również ich możliwości w zakresie osiągnięcia celów misji w sposób pozwalający na obserwacje w sposób ciągły²
- *Analogowy Habitat Kosmiczny (AHK)* jest narzędziem badawczym służącym do przeprowadzania testów analogowych oraz analogowych symulacji misji w określonych warunkach. Analogowe habitaty kosmiczne uwzględniają analogowe, analogiczne oraz testowe placówki, a ich forma i funkcja zależy od założonych działań analogowych.

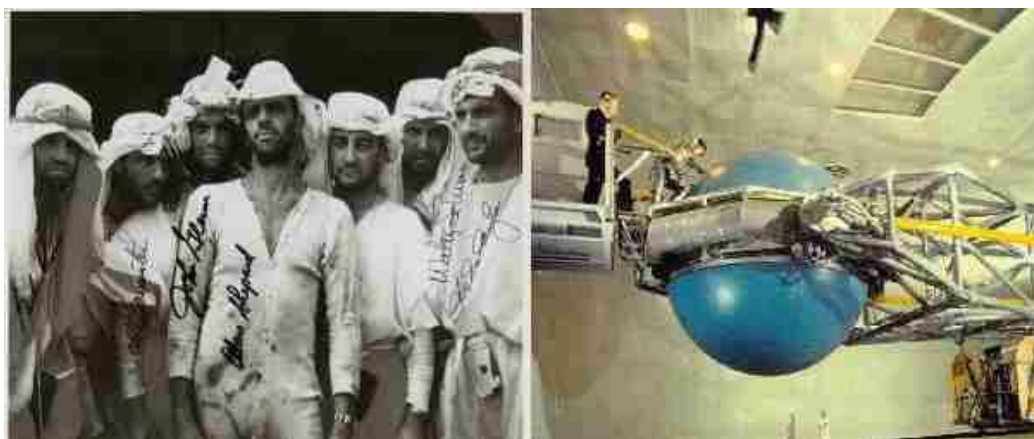
²Dodany wymóg ciągłości działań odróżnia analogowe symulacje misji od działań wykonywanych okazjonalnie, często przy okazji innych zadań

3.2 Analogowe symulacje misji przed 1991r.

Początków działań analogowych można doszukiwać się w testach oraz treningach astronautów programu Mercury. Chcąc przygotować astronautów do odbycia misji w warunkach, w jakich człowiek wcześniej nie przebywał, stosowano szereg *analogicznych* sytuacji jak loty treningowe suborbitalnymi samolotami, ekspedycje do ekstremalnych środowisk, loty paraboliczne oraz treningi podwodne [58].



Rysunek 3.2: Trening na myśliwcach i w czasie lotów parabolicznych, źródło: [59]



Rysunek 3.3: Test pustynny oraz trening w wirówce, źródło: [60]

Pierwszym badaniem określonym mianem misji analogowej była misja łodzi podwodnej Ben Franklin. Ekspedycja 15 metrowej łodzi podwodnej przygotowywana była przez zdobywcę Rowu Mariańskiego Jacques'a Piccard'a. Jej celem było badanie prądu atlantyckiego Gofsztröm w czasie trzydziestodniowej misji. W skład sześciuosobowej załogi wszedł Chester May, pracownik NASA, który znalazł się na pokładzie na prośbę Wernera von Brauna, głównego inżyniera odpowiedzialnego za program Apollo ³. Powodem zainteresowania von Brauna misją łodzi podwodnej była próba obserwacji zachowania się grupy ludzi zamkniętych w małej przestrzeni w stresujących warunkach.

³<http://seawifs.gsfc.nasa.gov/FRANKLIN>

Uznał te warunki, za analogiczne dla przyszłych długoterminowych misji kosmicznych. Ekspedycja wyruszyła z Florydy 14 lipca 1969 roku – dwa dni przed startem Apollo 11. Misja osiągnęła zamierzone cele naukowe pozwalając zebrać dane z zakresu socjologii oraz psychologii izolacji. Biorąc pod uwagę dyskusje na temat nazewnictwa działań analogowych określić można to działanie jako misję analogiczną umożliwiającą testy analogowe na potrzeby załogowego programu kosmicznego.



Rysunek 3.4: Ben Franklin, źródło: [61]

Biosphera 2.0 wybudowana w Arizonie między 1987 a 1991 rokiem była prywatną inwestycją miliardera Eda Bassa oraz wizjonera Johna P. Allana [62]. Projekt wiązał się z wizją kolonizacji Marsa i przyciągnął uwagę mediów, które bacznie śledziły projekt. Po ukończeniu budowy przeprowadzono 2-letni test z udziałem 9 „Marsonautów”, którzy mieli w izolacji dbać o skomplikowany ekosystem projektu oraz przeżyć na wyprodukowanych przez siebie zasobach. Z powodu destabilizacji zamkniętego ekosystemu spowodowanego niedostatecznym nasłonecznieniem roślin w okresie zimy i narastającego poziomu dwutlenku węgla placówkę trzeba było rozszczelnić i wprowadzić świeże zapasy powietrza. Opinia publiczna uznała to za porażkę programu oraz symulacji nie przyjmując argumentacji, że eksperymenty na skomplikowanych systemach, jakim jest sztuczna biosfera mogą mieć nieprzewidziane wyzwania. Późniejsze analizy wykazały, że za powolny spadek poziomu tlenu odpowiedzialne były betonowe elementy konstrukcji, które wiązały tlen.

Druga symulacja, po uwzględnieniu korekt technicznych i z nową załogą rozpoczęła się w roku 1994. Jednak i druga misja nie przebiegła pomyślnie i została przedwcześnie zakończona po 6 miesiącach, a program zamknięto. W roku 2020 korzystając z dofinansowania NASA rozpoczęto restaurację małego modułu testowego Biosphere 2 w celu stworzenia tam habitatu analogowego SAM – Space Analog for the Moon and Mars.

W Związku Radzieckim w 1968 roku zaczęto budowę placówki testowej Bios-3 w Krasnorajskim Instytucie Biofizyki. Placówka testowa miała badać zamknięte biologiczne systemy podtrzymywania życia produkujące tlen oraz pożywienie dla 3 osobowej załogi. Pierwsze misje zaczęły się w 1972 roku. Był to pierwszy przykład wykorzystania placówki testowej w celach stworzenia zamkniętego ekosystemu. Badania były prowadzone na potrzeby programu kosmicznego oraz obronnego. Od 2005 roku badania są ponownie prowadzone przy współpracy z ESA [63].

4 Kryteria oceny analogowych habitatów kosmicznych na podstawie badań literaturowych

4.1 Podstawowe cele: projektowanie załogowych misji kosmicznych i architektura misji

W celu poprawnego zrozumienia wielu aspektów związanych z analogowymi habitatami kosmicznymi wymagany jest przegląd specyfiki ograniczeń fizycznych oraz technologicznych związanych z projektowaniem załogowych lotów kosmicznych. Zrozumienie podstawowych zasad działania rakiet, wynoszenia ładunków na zadane trajektorie czy wyzwań stawianych logistyce kosmicznej stanowią podstawę do zrozumienia zasad projektowania kosmicznej architektury, której modelami są AHK. Przegląd zagadnień związanych z architekturą kosmiczną będzie streszczeniem obecnie dostępnej wiedzy z zakresu projektowania przyszłych obiektów, ale również opierać się będzie o historyczne dane o ergonomii w załogowych misjach kosmicznych. Analogowe habitaty kosmiczne będą następnie opisywane oraz analizowane na podstawie dostępnych informacji w celu określenia jaki aspekt załogowych lotów kosmicznych ujmują w swoich projektach i jakie tematy badawcze poruszają.

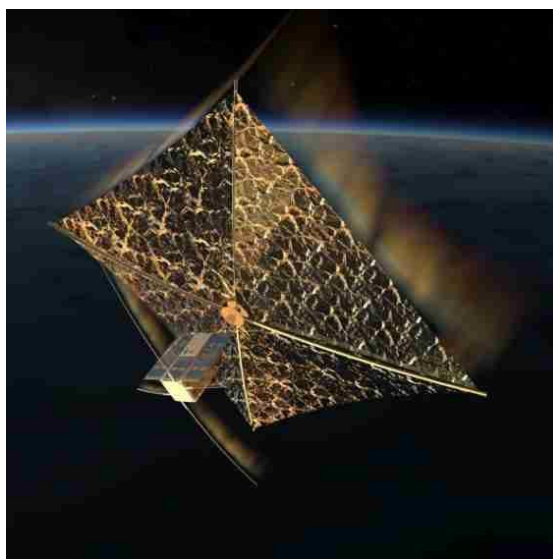
4.1.1 Podstawowe ograniczenia: Logistyka kosmiczna

Podstawy technologii raketowej opracowywał wspomniany już Konstantyn Ciolkowski, który w swojej pracy z 1903 roku przedstawił tzw. *wzór raketowy* określający prędkość rakiety zużywającej paliwo podczas lotu [1]

$$v = w \cdot \ln(m_0/m) \quad (4.1)$$

gdzie v - prędkość idealna końcowa rakiety, w - prędkość strumienia czynnika roboczego (gazów wylotowych) mierzona w układzie odniesienia związanym z rakieta (impuls właściwy), m_0 - masa początkowa rakiety z paliwem, m - masa końcowa rakiety (bez paliwa), \ln oznacza logarytm naturalny. Rakieta musi oderwać się od Ziemi z pełnymi zbiornikami paliwa. Od momentu startu ciągle traci na masie zużywanego paliwa aby ostatecznie osiągnąć odpowiednią prędkość by dotrzeć w pożądane miejsce. Im większa prędkość potrzebna do osiągnięcia tego celu, tym więcej paliwa rakieta musi zabrać i zarazem mniejszą masę potencjalnego ładunku

Rakiety by znaleźć się na orbicie Ziemi muszą pokonać jej grawitację i osiągnąć pierwszą prędkość kosmiczną, która dla naszej planety wynosi 7,91 km/s. Wtedy to pojazd porusza się z taką prędkością, że utrzymuje stałą odległość nad powierzchnią planety, a siła odśrodkowa równoważy siłę przyciągania grawitacyjnego. Niższa prędkość skutkować będzie powrotem na Ziemię, który bez odpowiedniego kąta wejścia oraz osłon termicznych oznacza spłonienie w wyniku rozgrzania przez tarcie w atmosferze. Jako granicę kosmosu przyjęto tzw. linię Karmana znajdującą 100 km nad powierzchnią Ziemi. Na takiej wysokości atmosfera jest już na tyle rzadka¹, że można umieszczać satelity, stacje kosmiczne, kapsuły bez obawy, że opór powietrza spowolni je i spowoduje wejście w atmosferę przed zakończeniem ich misji. Oczywiście jest to granica umowna – resztki atmosfery Ziemi sięgają daleko nad powierzchnię planety i dlatego pojazdy kosmiczne muszą okresowo korygować swoje orbity. Z drugiej strony, obecność nieużywanych obiektów kosmicznych poza linią Karmana jest niebezpieczna dla aktualnych misji kosmicznych. Testuje się tzw. żagle deorbitacyjne służące do zwiększenia oporu powietrza nawet, w znikomej atmosferze powyżej linii Karmana, by przyspieszyć zejście z orbity i spalanie satelity po zakończeniu jego misji [64].



Rysunek 4.1: Wizualizacja deorbitacji PW-SAT2, źródło: [65]

Przy starcie rakieta musi oprócz grawitacji pokonać opory powietrza, a to powoduje dodatkowe zużycie paliwa. Naturalnym jest, więc, że rakieta i jej ładunek muszą mieć aerodynamiczny kształt, by te opory zminimalizować. Natomiast satelita nie musi być już aerodynamiczny, ponieważ porusza się praktycznie w próżni, a jego konstrukcja może być bardzo delikatna, bo nie musi przenosić większych naprężeń ze względu na brak ciężenia. Podczas startu rakiety i podczas przechodzenia przez atmosferę satelita musi być odpowiednio zabezpieczony i z tego względu zamyka się go w owiewce rakiety. Z zasad aerodynamiki wynika maksymalny gabaryt ładunku, który może być umieszczony pod owiewką rakiety.

¹<https://archive.is/20121220160012/http://www.fai.org/icare-records/100km-altitude-boundary-for-astronautics>



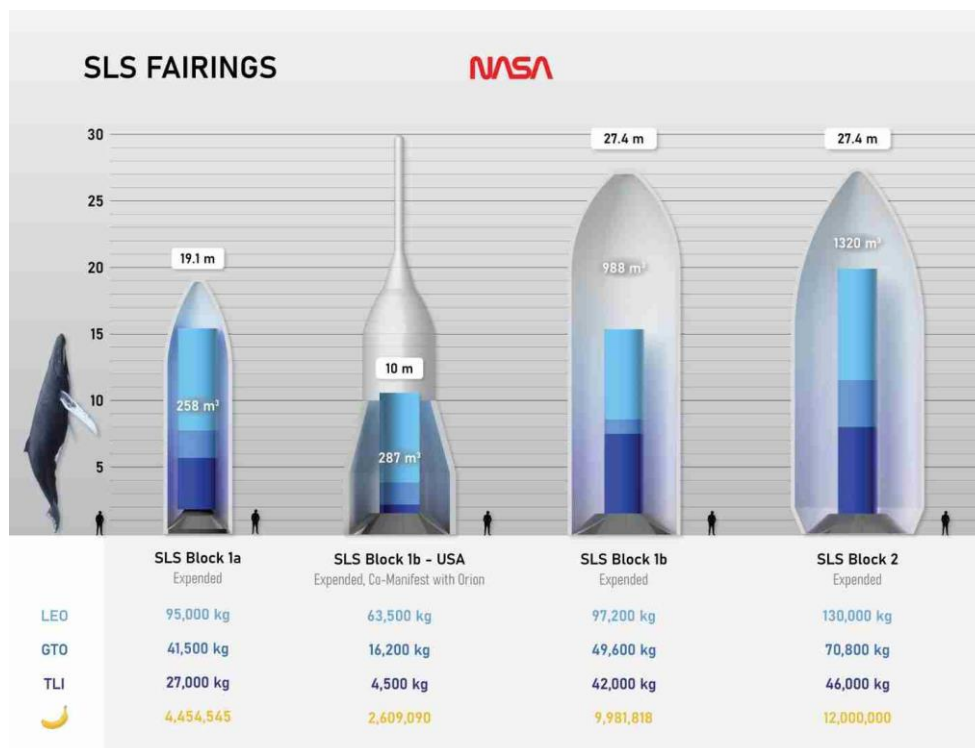
Rysunek 4.2: Rakieta odrzucająca owiewkę powyżej linii Karmana, źródło: [66]

Oznacza to, że maksymalna masa oraz kubatura ładunku zależą od możliwości rakiety, miejsca startu oraz miejsca docelowego. Ilustracja 4.3 przedstawia planowane możliwości rodziny rakiet SLS budowanych obecnie przez firmę Boeing na zlecenie NASA, które jeszcze do niedawna miały być podstawą dla powrotu ludzi na Księżyc (Rys. 4.3). Przedstawiono wysokości oraz objętości owiewek oraz maksymalne masy ładunków na LEO – niską orbitę Ziemi (Low Earth Orbit), GTO – orbitę transferową dla satelitów geostacjonarnych (Geostationary Transfer Orbit) i TLI – orbitę pozwalającą wysłać ładunek w kierunku Księżyca (Trans-Lunar Injection).

Rakiety SLS nie są jeszcze zbudowane, nawet w najbardziej podstawowej wersji SLS Block 1a, a najpotężniejsza działająca rakieta – Falcon Heavy, firmy SpaceX, może wynieść na niską orbitę Ziemi tylko 55 ton ładunku, co jest znacznym osiągnięciem, jednak nie wystarcza do planowanych misji kosmicznych². Patrząc na to zagadnienie pod kątem misji załogowych musimy sobie uzmysławić, że przestrzeń życiowa nie zajmuje ani całej objętości ładunku ani całej masy. Statek kosmiczny jest pojazdem podróżującym w niebezpiecznym środowisku, tak więc na jego masę i kubaturę składają się:

- zbiorniki paliwa oraz układy napędowe,
- przyrządy nawigacyjne oraz komunikacyjne,
- osłony termiczne, radiacyjne oraz mikrometeorytowe,
- systemy podtrzymywania życia oraz zbiorniki wody i powietrza,
- wyposażenie i aparatura związane z misją,
- pomieszczenia zapewniające przestrzeń życiową dla astronautów.

²<https://www.spacex.com/vehicles/falcon-heavy/>, dostęp grudzień 2022



Rysunek 4.3: Rodzina rakiet SLS – Space Launch System NASA. Zestawienie objętości owiewek z maksymalnymi masami ładunku na LEO, GTO oraz TLI. Pierwszy start planowany na 2022 źródło: [67]

Z powodu tych ograniczeń, w trakcie projektowania misji kosmicznych prowadzi się analizy dotyczące minimalnych wymiarów ładunku koniecznego do wykonania misji. Masa oraz przestrzeń są bardzo ograniczone i dlatego ich optymalizacja jest czynnikiem determinującym powodzenie misji.

Przedstawione wymagania pozwalają na wyciąganie pierwszych wniosków dotyczących identyfikacji determinantów w kształtowaniu formy dla habitatów kosmicznych, a w tym również dla analogowych habitatów kosmicznych. Wcześniej jednak konieczne jest krótkie omówienie zasad planowania zaawansowanych misji kosmicznych.

4.1.2 Architektura misji, czyli planowanie misji kosmicznych

Znając już ograniczenia wynikające z wykorzystywania rakiet, przybliżona zostanie metoda, dzięki której można planować skomplikowane misje kosmiczne wykorzystujące wiele startów. Pierwsze stacje kosmiczne były monolityczne i składały się z jednego modułu wynoszonego na orbitę. Teoretycznie, wymagany był tylko jeden start rakiety by stacja była gotowa na przyjęcie załogi, w rzeczywistości jednak konieczne były kolejne starty rakiet dostarczających załogę i zapasy potrzebne do życia i realizacji zadań. Późniejsze projekty były bardziej skomplikowane, ponieważ stacje były składane z kilku modułów, które trzeba było wynieść na orbitę przy pomocy niezależnych rakiet lub promów, a następnie połączyć, czy też wspólnie zadokować.

Stanie się to jeszcze trudniejsze, jeśli operacja ta będzie wykonana nie na niskiej orbicie Ziemi, ale na orbicie Księżyca, Marsa, lub na ich powierzchniach. By zaplanować wiele startów rakiet wynoszących różne elementy misji na odpowiednie trajektorie przygotowuje się tzw. *architekturę misji*, pojęcie wywodzące się z planowania projektów niezwiązanych z architekturą. Architektura misji jest wymagana dla każdej misji kosmicznej. Opublikowana w marcu 2021 instrukcja *NASA Space Mission Architecture Framework (SMAF)* opisuje architekturę misji, jako współczesny, oparty na modelowaniu, program zarządzania projektem oraz inżynierią systemów. Zawiera tabele wymagań, szczegóły rozwiązań technologicznych, strukturalnych, kosztorysy, harmonogramy dla różnych faz projektu, oraz wiele innych informacji pozwalających zarządzać rozwojem oraz realizacją zaawansowanej misji kosmicznej³.

Składowe architektury misji

Instrukcja NASA SMAF dzieli składowe architektury misji na pięć działów:

- wymogi naukowe, cele, zadania
- architektura systemów misji skupiająca się na aspektach inżynierskich i technologicznych
- projekt oraz zarządzanie odpowiadające za terminarze, kosztorysy oraz koordynacje
- zasoby obecne i planowane opisujące zaplecze infrastrukturalne, wyposażenie oraz personalne,
- opis środowiska projektu ujmujący wszystkie strony partycypujące w projekcie oraz ich cele i priorytety, które również wpływają na projekt.

Dla realizacji misji kosmicznej każdy z działów musi zostać szczegółowo zaplanowany, a ich zawartość wpływać będzie na inne działy. Możliwości czasowe, finansowe, czy też osobowe wpływać będą na możliwości technologiczne, czy możliwość osiągnięcia planowanych celów. Wiele zespołów inżynierskich jednak projektuje teoretyczne misje kosmiczne skupiając się głównie na pierwszych dwóch działach, by udowodnić, że takie przedsięwzięcie jest możliwe do realizacji przy obecnym poziomie technologicznym, gdyby tylko znalazła się wola oraz finansowanie. Studium takie może pomóc wyznaczyć cele rozwoju dla agencji kosmicznej bądź instytucji. Po przedstawieniu inżynierskiej koncepcji przychodzi czas na jej „lobbowanie”, by pozyskać przychyłność agencji, a co za tym idzie budżet, zespół, dostęp do infrastruktury. Dopiero wtedy jest możliwa praca nad dwoma pozostałymi działami architektury misji. W znacznym stopniu wpływają one na ostateczną wizję celów oraz projektu technologicznego.

³NASA SMAF 03-2021

1. Potrzeby nauki, cele i zadania <ul style="list-style-type: none"> • nadrzędny główny cel naukowy • konkretne cele naukowe • pomiary • analiza i przetwarzanie 	2. Architektura systemu misji <ul style="list-style-type: none"> • struktura i interfejsy • możliwości i funkcje • przetwarzanie danych i produkty • standardy, ograniczenia reguły, kontekst
3. Projekt/zarządzanie <ul style="list-style-type: none"> • kierunki projektu • koszt, harmonogram, zasoby • ryzyko techniczne i programowe • status i raportowanie • koordynator zespołu • analiza i rozwiązywanie problemów 	4. Zasoby – bieżące i planowane <ul style="list-style-type: none"> • udogodnienia • sprzęt • infrastruktura • siła robocza • inne
5. Środowisko misji i projektu <ul style="list-style-type: none"> • naturalne • między centrami i między agencjami 	

Rysunek 4.4: Składowe Architektury Misji źródło: [68]

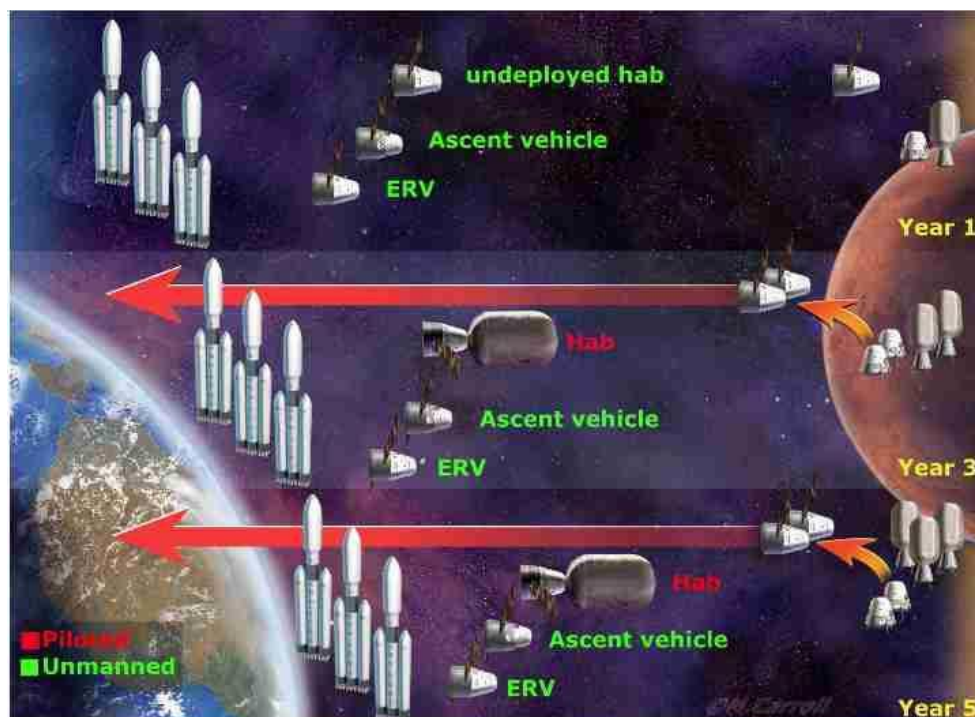
4.1.3 NASA Mars Reference Missions

W poniższym podrozdziale zostaną przedstawione koncepcje załogowych misji na Marsa od roku 1991 w ciągu chronologicznym w celu ukazania procesu kształtowania się koncepcji programu NASA na przestrzeni ostatnich 30 lat. Programy te często przybierały postać koncepcji *Architektury Misji* pozwalającej określać wymagania dla strategicznego rozwoju programów badawczych NASA. Rys historyczny będzie zawierał aspekty niektórych działań agencji kosmicznych w USA oraz w Europie wynikające z planów rozwoju analogowych habitatów kosmicznych. Przedstawienie tych strategii będzie pomocne we wskazaniu roli, jaką pełnią habitaty kosmiczne w programach badawczych, oraz jakie jest ich znaczenie dla przyszłych załogowych misji kosmicznych. Poczynając od roku 2013 w niektóre z działań autor był zaangażowany osobiście lub wraz z zespołem *Space is More*. Zostały one również ujęte w tym zestawieniu jako ilustracja rozwoju kwalifikacji i zaangażowania zawodowego autora.

Rok 1991: Mars Direct

Przykładem propozycji Architektury Misji, która na stałe wpłynęła na plany NASA była zewnętrzna propozycja dwóch inżynierów koncernu Martin Marietta (obecnie Lockheed Martin) Roberta Zubrina i Davida Bakera, którzy w 1991 roku zaproponowali kompletną architekturę załogowej misji na Marsa [69]. Przedstawili technologicznie osiągalną i budżetowo zoptymalizowaną koncepcję pierwszych misji na Marsa (Rys.4.5. Architektura uwzględniała terminarze misji, starty rakiet, wizję kapsuły załogowej pozwalającej astronautom przeżyć w akceptowalnych warunkach ponad 9 miesięczną podróż. Zaprojektowali też lądownik, habitat planetarny oraz pojazd powrotny.

Mimo, iż propozycja nadal wymagałaby miliardów dolarów budżetu to była dziesięciokrotnie tańsza niż dotychczasowe plany NASA dotyczące załogowej misji



Rysunek 4.5: Mars Direct – schemat lotów oraz ładunków między Ziemią a Marsem na przestrzeni 5 lat, źródło [69]

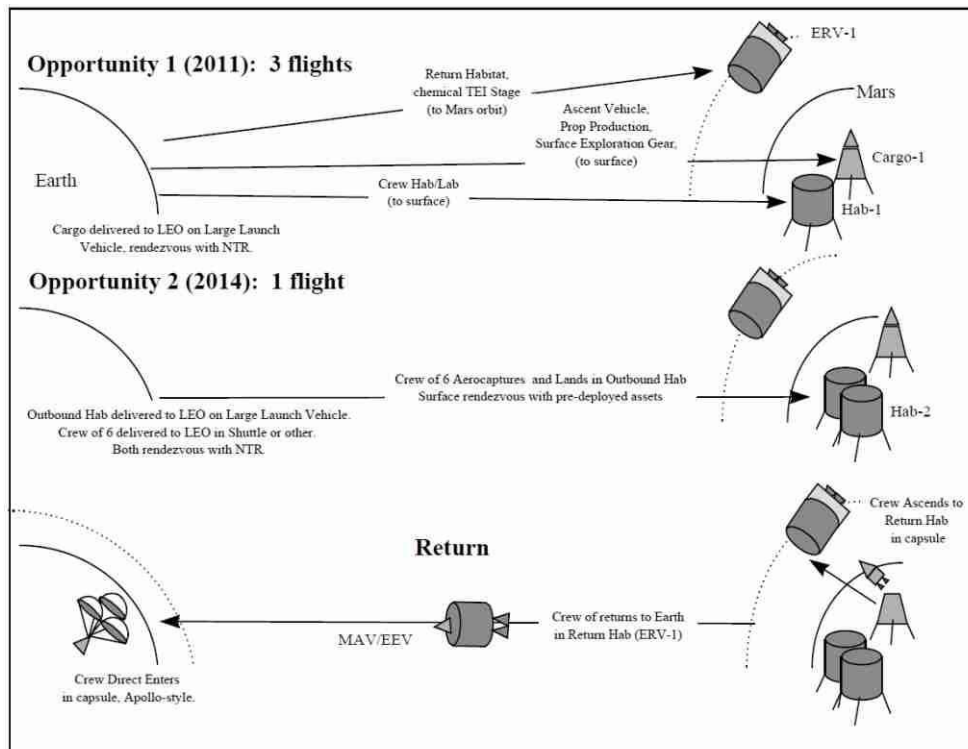
na Marsa. Koncepcja zaczęła zyskiwać na popularności na wielu szczeblach hierarchii agencji kosmicznej, by ostatecznie w zmodyfikowanej formie zostać uznana za właściwe podejście do planowania załogowej misji na Marsa⁴. Zaczęły powstawać oficjalne dokumenty NASA pomagające nakreślać kierunki rozwoju do urzeczywistnienia tych planów w przyszłości w postaci raportów „NASA Mars Reference Mission” czasem nazywaną też „Mars Semi-Direct”

Rok 1993: NASA Mars Reference Mission

NASA Mars Reference Mission (NMRM) (por. Rys. 4.6) nigdy nie osiągnęło statusu pełnej architektury misji z zapewnionym pełnym poparciem senatu USA i finansowaniem. Stała się za to wartościowym dokumentem określającym kierunki rozwoju programu lotów załogowych na Marsa i w ramach tych kierunków powstało wiele oddzielnych projektów badawczych oraz misji eksploracyjnych działających, jako oddzielne projekty i kompletne architektury misji. Kolejne wersje dokumentu pojawiały się w latach 1997 [70], 1998 [71] oraz w 2009 [40] kończąc na piątej iteracji dokumentu.

Poczynając od wersji Mars-Direct z 1993 roku aż do Mars Reference Mission wersji 4.0 z 1998, załogowa misja na Marsa była opisywana i planowana dla załogi 6 osobowej [71]. Załoga sześciuosobowa wymieniła oryginalnie zaproponowaną załogę czteroosobową z Mars Direct. Zmiana ta wynikała z chęci zapewnienia zabezpieczenia najważniejszych kompetencji załogi, gdzie każda osoba posiadała więcej niż jedną krytyczną rolę – pilota, naukowca, lekarza, inżyniera.

⁴<https://www.wired.com/2013/04/mars-direct-1990/>, dostęp grudzień 2022



Rysunek 4.6: Oryginalny schemat lotów Mars Semi-Direct 1993, źródło: [69]

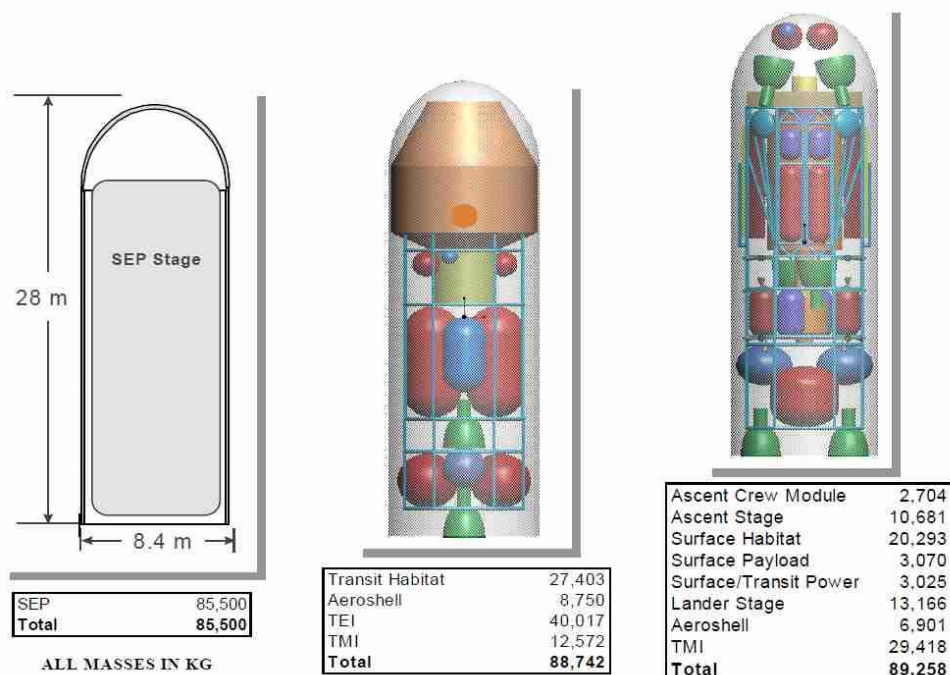
Oryginalnie, koncepcja misji zakładała trzy starty rakiet w roku 2011 (18 lat od publikacji planu). Najpierw na ciężkich rakietach nośnych (nieistniejących w tamtych latach) miano wystrzeliwać w kierunku Marsa ładunki bez załogi. Wśród ładunków był: habitat powrotny na Ziemię, który miał zaparkować na orbicie Marsa, pojazd wznoszący (MAV), który miał umożliwić dotarcie przyszłej załogi z powierzchni Marsa na Orbitę i spotkanie z habitatem powrotnym, oraz habitatem planetarnym. Dopiero po uzyskaniu pewności, że te podstawowe elementy dotarły na swoje miejsca i funkcjonują poprawnie w 2014 roku rozpocząć miał się kolejny etap misji, tym razem z załogą, która miała wyruszyć w pojeździe transferowym oraz z kolejnym habitatem planetarnym, który po wylądowaniu będzie służył za placówkę zapasową, albo placówkę dla przyszłej załogi. Po wykonaniu misji planetarnej załoga miała użyć Mars Ascent Vehicle (MAV), by dotrzeć na orbitę do habitatu powrotnego i powrócić na Ziemię.

Koncepcja zakładała użycie hipotetycznych ciężkich rakiet nośnych mogących wystrzelić na trajektorię Hohmana⁵ w kierunku Marsa ładunki o masie 90 ton. Rakiety SLS, które NASA jeszcze musi przetestować w ich najbardziej ambitnych konfiguracjach mogłyby wynieść na taką trajektorie około 45 ton. Szacuje się, że rakieta Super Heavy mogłaby wynieść w kierunku Marsa 100 ton ładunku⁶. Obie rakiety miały w 2021r. odbyć swoje pierwsze testy orbitalne⁷.

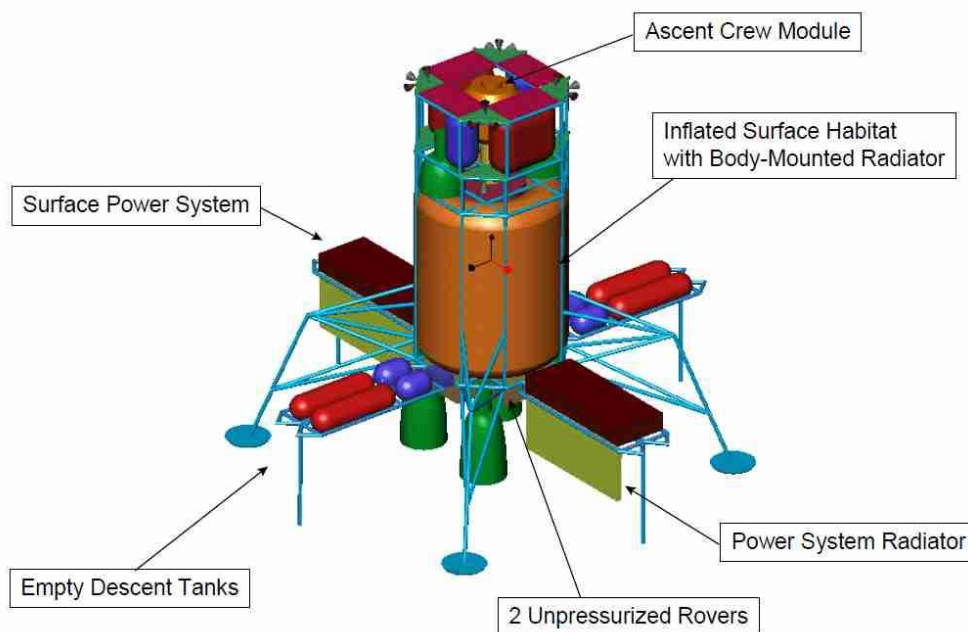
⁵Manewr ekonomicznej zmiany orbity kołowej statku kosmicznego na wyższą lub niższą, przez dwukrotne użycie silników. Nazwa pochodzi od nazwiska Waltera Hohmanna, niemieckiego naukowca, który opublikował założenia tego manewru w 1925 r.

⁶<https://www.spacex.com/vehicles/falcon-heavy/>, dostęp grudzień 2022

⁷<https://www.nasa.gov/sls>, dostęp grudzień 2022



Rysunek 4.7: Schemat ładunków trzech rakiet zmierzających na Marsa z koncepcji z 1998 roku, źródło: [70]



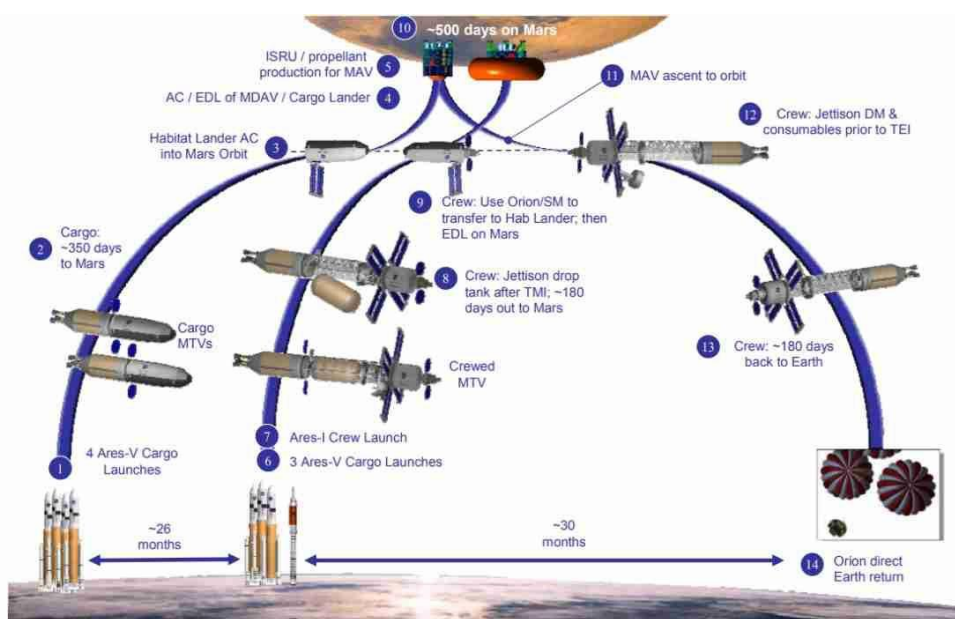
Rysunek 4.8: Koncepcja nadmuchiwane habitatu z 1998 roku, źródło: [70]

Koncepcja habitatu według opracowanych dokumentów była mało precyzyjna, można jednak określić jej podstawowe charakterystyki. Habitat miał mieć formę nadmuchiwane wertykalnego cylindra. W wersji NMRM z 1998 roku na szczycie habitatu znajdował się też moduł wznoszący, co oznaczało, że przy powrocie na orbitę Marsa załoga nie tylko porzucała habitat, ale niszczyła go odrzutem silników rakietowych.

Autorzy raportu brak szczegółowych planów habitatu planetarnego uzasadnili potrzebą przebadania tego zagadnienia za pomocą placówek badawczych, analogowych ekspedycji oraz analogowych habitatów. Te ostatnie dopiero miały zacząć się pojawiać.

Rok 2009: NASA Mars Reference Mission 5.0

W roku 2009 zespół projektowy z NASA opublikował od dawna wyczekiwaną nową iterację Mars Reference Mission tym razem z numerem 5.0 [72]. Architektura Misji uwzględniała nowe typy rakiet nośnych z rodziny Ares opracowywane w ramach programu Constellation. Pierwszy raz pozwoliło to zaplanować koncepcje załogowej misji na Marsa w oparciu o realne finansowo i możliwe technologiczne propozycje. Architektura misji powróciła do oryginalnej czteroosobowej załogi z propozycji z 1991 roku ze względu na możliwości potencjalnych rakiet nośnych. Zespół projektowy również wspierał się koncepcjami habitatów opracowywanych na potrzeby misji Księżycowych, które również zakładały taką liczebność załogi. Raport rozważał użycie jednej z dwóch koncepcji habitatu planetarnego – wersji posiadającej 197,73 m³ objętości użytkowej oraz wersji posiadającej 154 m³. Konieczną zaproponowaną zmianą w koncepcjach tych habitatów było podwyższenie masy o 30 procent (Rys.4.9).



Rysunek 4.9: Mars Reference Mission 5.0 – schemat misji na Marsa, źródło: [57]

4.2 Forma i funkcja – badanie architektury kosmicznej

W poprzednim podrozdziale przedstawione zostały przykłady projektów oraz programów z zakresu planów załogowej eksploracji kosmosu oraz rozwoju analogowych habitatów kosmicznych. Wspomniany obszar kosmicznej architektury jest obiektem szerokich badań praktycznych oraz teoretycznych.

Inżynierowie oraz architekci podejmują próby zdefiniowania metod projektowych oraz ustalenia poziomu dojrzałości koncepcji, bądź prototypu habitatu.

4.2.1 Projektowanie habitatów kosmicznych pod kątem wyzwań środowiskowych oraz technologicznych

W cytowanej wcześniej książce autorstwa Sandry Häuplik-Meusburger i Olgi Bannovej [54] można znaleźć wiele czynników środowiskowych oraz technologicznych wpływających na projekty architektury kosmicznej. Można je podzielić na trzy podstawowe działy:

1. dotyczące systemów podtrzymywania życia,
2. dotyczące zagrożeń środowiskowych,
3. dotyczące wyzwań behawioralnych.

Ad 1. Systemy podtrzymywania życia.

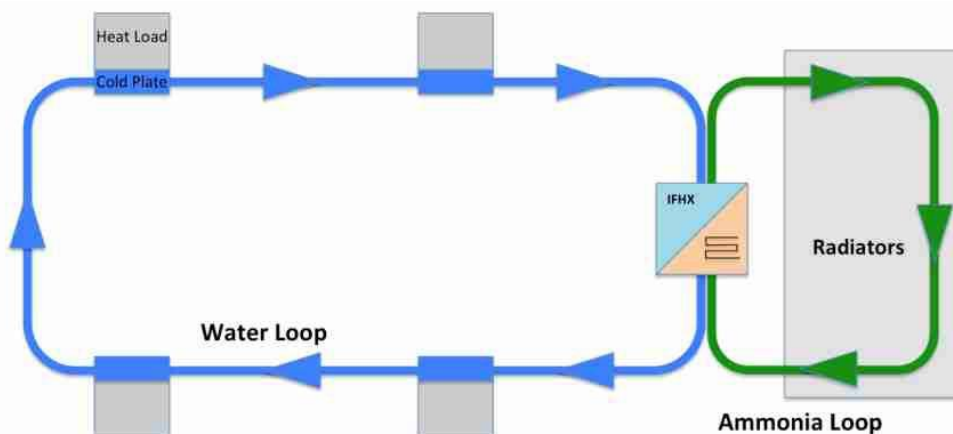
Systemy podtrzymywania życia wiążą się z zapewnieniem istotom żywym znajdującym się na pokładzie statku kosmicznego dogodnych lub przynajmniej wystarczających warunków do życia. Podczas prac projektowych architekci oraz inżynierowie muszą brać pod uwagę następujące czynniki:

a/ Atmosfera – odpowiednio dobrana mieszanina gazów oraz ich ciśnienia pozwalająca wykonać misję i utrzymać załogę w zdrowiu. Podczas misji Apollo ciśnienie w kabinie wynosiło 34 kPa (34% ciśnienia ziemskiego) a atmosfera składała się z czystego tlenu⁸. Atmosfera składająca się z samego tlenu niosła zagrożenie pożarowe (katastrofa Apollo 1). Obecnie na Międzynarodowej Stacji Kosmicznej ciśnienie wynosi 100 kPa (1 bar) przy zawartości tlenu 22% i azotu 78% [73]. Kolejna orbitalna stacja kosmiczna o nazwie Gateway będzie operowała przy obniżonym ciśnieniu, prawdopodobnie podobnie będzie również na placówkach księżycowych. Obecnie cała atmosfera potrzebna do przeprowadzenia misji zabierana jest z Ziemi jako ładunek. Membranowe systemy uzdatniające są w stanie odnowić zapasy tlenu w 98% oczyszczając go z wydychanego dwutlenku węgla. Kontrolowanie poziomu tlenu oraz dwutlenku węgla jest podstawowym zadaniem systemu podtrzymywania życia na stacji kosmicznej. Obecnie przeprowadzane są eksperymenty z wytwarzaniem tlenu za pomocą roślin, alg, jak również poprzez procesowanie gleby i atmosfery marsjańskiej [74], gleby księżycowej oraz potencjalnie wydobytej poza Ziemią wody.

b/ Ogrzewanie/chłodzenie oraz wilgotność powietrza – jest to ważny element utrzymywania dogodnych warunków do życia. Odpowiednia wilgotność powietrza w przedziale 40–60% jest zależna od temperatury. Z utrzymaniem temperatury natomiast wiąże się kilka wyzwań natury fizycznej. Międzynarodowa Stacja Kosmiczna orbitując Ziemię otrzymuje ze Słońca dużą ilość ciepła. Również każde urządzenie oraz członek załogi generują ciepło w związku z wykonywaną pracą. Głównym wyzwaniem na orbicie jest pozbycie się ciepła wytwarzanego na stacji.

⁸<https://history.nasa.gov/afj/aoh/aoh-v1-2-04-sps.pdf>, grudzień 2022

W próżni jedyną metodą jest radiacja nadmiaru ciepła poprzez radiatory w postaci płaskich paneli posiadających obieg ciepłej wody i wystawionych na próżnię kosmiczną (Rys. 4.10).



Rysunek 4.10: schemat odprowadzania ciepła na ISS, źródło: [54],

Na Księżycu oraz Marsie występowanie nocy powoduje, że ogrzewanie habitatu oraz sprzętu staje się bardziej niezbędne. Misje Apollo odbywały się zawsze w ciągu Księżycowego dnia i astronauta musieli dbać o to aby się ochłodzić. Jedynym znanym żywym organizmem przebywającym na Księżycu w czasie nocnym była bawełna kiełkująca w komorze uprawnej chińskiej sondy Change-4 w roku 2019⁹. Z uwagi na ograniczenia masy i uproszczenie systemów zasilania lądownika, komory nie wyposażono w grzałkę i wszystkie rośliny zamrzły podczas pierwszej nocy księżycowej¹⁰.

c/ Pożywienie – od początku lotów załogowych pożywienie astronautów musiało spełniać trzy podstawowe wymogi: miało być lekkie, zajmować mało miejsca oraz mieć długą trwałość. Wymogi te spełnia żywność liofilizowana, a pożywienie świeże dostarczane jest astronautom przy okazji misji zaopatrzeniowych. Żywność liofilizowana pozwala zaoszczędzić na wadze wody, która jest z potraw usunięta. Hermetyczne pakowanie zapewnia możliwość spożywania takiej żywności przez kilka lat, zajmuje też mało miejsca. By móc żyć oraz przygotować posiłki astronauta potrzebują również wody. Uwzględniając jedzenie, picie oraz higienę osobistą astronauta używają średnio 10 litrów dziennie na osobę. System filtrów membranowych z systemu podtrzymywania życia jest w stanie odzyskać 80% wody do kolejnego użycia. Źródła wody powracającej do systemu opisane zostaną w sekcji związanej z higieną oraz zarządzaniem odpadami¹¹. Dla planów budowy stałych placówek na Księżycu oraz Marsie powstaje potrzeba produkcji żywności oraz pozyskiwana wody. Badania nad uprawą roślin prowadzone są na Międzynarodowej Stacji Kosmicznej [75].

⁹W 2019 roku o powierzchnię Księżycyca rozbiła się Izraelska sonda posiadające na pokładzie mały ładunek naukowy z mikroorganizmami zwanymi Niesporczakami. Niesporczaki znane są jako ekstremofile, które mogą poradzić sobie z wysokim promieniowaniem, a przez pewien czas przeżyć w próżni. Nie wiadomo, czy organizmy przeżyły katastrofę i czy były w stanie żyć na powierzchni Księżycyca. [<https://www.space.com/beresheet-moon-lander-crash-site-photos.html>]

¹⁰<https://www.space.com/43025-china-moon-mission-plants-dead>, grudzień 2022

¹¹<https://www.space.com/2052-air-apparent-oxygen-systems-iss.html>

Obecnie prowadzone są badania oraz testy placówek do produkcji żywności w kontekście misji kosmicznych. Przykładami takich placówek są EDEN-ISS, Moon Palace, czy Bios-3, opisane są w kolejnym rozdziale.

d/ Higiena oraz zarządzanie odpadami. Zarządzanie odpadami jest elementem bardzo trudnym i znacząco wpływającym na samopoczucie załogi. W czasie misji Mercury oraz Apollo do oddawania stolca używano worków, dla mężczyzn do oddania moczu były pojemniki przypominające prezerwatywy. Ograniczenia w tym zakresie były jednym z powodów, dla których NASA nie rozpoczęła pracy z astronautkami aż do ery promów kosmicznych, kiedy pojawiły się pierwsze toalety ciśnieniowe. Problem z utrzymaniem higieny, ograniczenia w dostępie do wody oraz nagromadzenie odpadów do dziś stanowi wyzwanie nawet na międzynarodowej stacji kosmicznej. Stacja nie może sobie pozwolić na utratę wody, dlatego odzyskiwana jest ona również z moczu, fekalii oraz z potu, który trafia do systemu wentylacyjnego. Odpady w postaci wysuszonych fekalii oraz opakowania po pożywieniu są składowane a następnie wysyłane na Ziemię w powracających statkach zaopatrzeniowych. Do niedawna statki zaopatrzeniowe oraz śmieci spalały się w atmosferze, obecnie lądują dzięki użyciu kapsuły Dragon firmy SpaceX. Na potrzeby samowystarczalności przyszłych placówek zasób jakim są odpady biologiczne planuje się wykorzystywać w postaci nawozów na potrzeby produkcji żywności. Programem europejskim zajmującym się takimi zagadnieniami związanym z Europejską Agencją Kosmiczną jest program MELLiSA – projektująca biologiczny system podtrzymywania życia oparty na obiegu gospodarcze zasobami oraz odpadami [76].

Ad 2. Zagrożenia środowiskowe.

Zagrożenia środowiskowe opisują potencjalne zagrożenia zewnętrzne dla załogi. Zagrożenia te zależą od środowiska w jakim umiejscowiony jest habitat i mogą mieć wpływ na bezpieczeństwo struktury i technologii albo bezpośrednio na zdrowie i życie załogi. Przed niektórymi zagrożeniami można się ochronić, w przypadku niektórych możliwe jest jedynie przeciwdziałanie.

a/ Mikrometeoroty oraz śmieci kosmiczne są zagrożeniem dla każdej struktury znajdującej się poza atmosferą Ziemi. Niska orbita Ziemi ma problem z odłamkami poruszającymi się z ogromną prędkością, Księżyc oraz Mars od czasu do czasu bombardowane są meteorytami. Ochrona przed tymi trudnymi do wykrycia i uniknięcia kolizjami spoczywa na strukturze habitatu. Obecnie moduły Międzynarodowej Stacji Kosmicznej stosują ochrony warstwowe pozwalające na znaczne rozproszenie energii kinetycznej uderzającego obiektu. Na potrzeby przyszłych stacji na Księżycu oraz Marsie przewiduje się wykorzystanie regolitu w celu stworzenia kilkudziesięciocentymetrowej warstwy ochronnej.

b/ Mikrogravitacja, ale również makrogravitacja stanowią zagrożenie dla organizmów, które wyewoluowały w środowisku o określonym ciężeniu. Długotrwałe przeciążenia związane z przyspieszeniem prowadzą do utraty przytomności, pogorszeniem wzroku, oraz z problemami z układem respiracyjnym oraz krążenia. Długoterminowe przebywanie w mikrogravitacji niesie ze sobą redukcję mięśni, zmniejszeniem mięśnia sercowego, zaburzeniem dystrybucji płynów w organizmie, odwapnieniem kości, zaburzoną gospodarką hormonalną, problemami ze wzrokiem, oraz powiązаныmi schorzeniami [77].

Na międzynarodowej stacji kosmicznej trwają badania nad Spaceflight-Associated Neuro-ocular Syndrome (SANS), czyli syndromem neuro-okularowym związanym z lotami kosmicznymi powodujące stałe pogorszenie się wzroku. Intensywny trening przed oraz w trakcie misji jest podstawową metodą zapobiegawczą. Z kolei przyzwyczajenie do mikrogravitacji skutkuje długotrwałym procesem ponownego przystosowania do grawitacji Ziemskiej. Nie są jeszcze znane długotrwałe efekty zmniejszonej grawitacji Księżyca oraz Marsa na zdrowie ludzkie, ale przewiduje się, że są podobne do tych związanych z mikrogravitacją. Problemy wpływu zmniejszonej grawitacji bada się również na roślinach, gryzoniach oraz insektach.

c/ Promieniowanie jest niebezpieczne dla istot żywych oraz dla elektroniki. Na Ziemi chroni przed nim gęsta atmosfera, a przede wszystkim pole magnetyczne, które chroni też satelity oraz stacje kosmiczne znajdujące się poniżej pasów van Allena. Można wyróżnić dwa źródła promieniowania: promieniowanie docierające od Słońca oraz promieniowanie galaktyczne dobiegające do nas ze wszystkich stron Wszechświata [78]. Promieniowanie galaktyczne (galactic cosmic rays) jest bardzo poważnym zagrożeniem dla ludzi i sprzętu. Wysokoenergetyczne jądra atomów powodują niszczenie elektroniki oraz błędy układów scalonych, mogą doprowadzić do zniszczenia podsystemów habitatu, a dla istot żywych oznaczają niebezpieczeństwo zmian rakotwórczych [79]. Załoga Międzynarodowej Stacji Kosmicznej jest w dużym stopniu chroniona przez pole magnetyczne Ziemi, ale przy dalszych misjach astronauta oraz ich sprzęt muszą być dodatkowo chronieni przed tego typem promieniowania. W Układzie Słonecznym częściową ochronę daje nam wiatr słoneczny, który otacza nasz układ przekierowując część promieniowania galaktycznego. Siła wiatru słonecznego zależy jednak od 12 letniego cyklu aktywności Słońca. Kiedy Słońce jest najbardziej aktywne i posiada okazałe plamy słoneczne jesteśmy najlepiej chronieni przed promieniowaniem galaktycznym. Wzrasta wtedy jednak też intensywność promieniowania Słonecznego, jak również dochodzi do koronowych wyrzutów masy niosących wysokoenergetyczne cząstki będące zagrożeniem dla istot żywych, infrastruktury orbitalnej oraz naziemnej [80]. W przypadku wysokoenergetycznego promieniowania słonecznego znany jest kierunek, z którego promieniowanie dochodzi i łatwiej jest się przed nim chronić, nie każdy też wyrzut koronalny następuje w kierunku Ziemi. Człowiek na Ziemi, rocznie przyjmuje dawkę promieniowania wynoszącą 4–5 mSv (milisiwerów), natomiast podczas rocznego pobytu na Międzynarodowej Stacji Kosmicznej astronauta może otrzymać 30–100 mSv. Ocenia się, że limit promieniowania jaką może otrzymać człowiek w ciągu swojego życia wynosi 400 mSv, nie ma jednak niezbitych dowodów, że większe dawki są rzeczywiście szkodliwe. Agencje kosmiczne takie jak ESA, czy ROSKOSMOS dopuszczają, aby człowiek otrzymał w ciągu życia 1000 mSv [81]. Przy odpowiedniej ochronie habitatu za pomocą regolitu bądź wody, można znacznie ograniczyć dawkę promieniowania. Przewiduje się, że astronauta przyjmie dawkę 100–120 mSv podczas rocznej misji księżycowej i dawkę 450 mSv dla trzyletniej misji marsjańskiej [82].

d/ Zagrożenia środowiskowe są zależne o warunków w jakich znajduje się habitat. Można określić szereg zagrożeń z tego faktu wynikających.

Na Księżycu można doświadczyć znacznych zmian temperatur oraz długich okresów nocy wpływających na sposób działania habitatu oraz jego systemów.

Ciążenie 0,19 G utrudnia poruszanie się, brak atmosfery nie chroni przed promieniowaniem ani przed uderzeniem meteorytów. Regolit księżycowy zebrany podczas misji Apollo okazał się bardzo drobny, o bardzo ostrych krawędziach (brak erozji), co powoduje zacinać się mechanizmów, niszczenie uszczelek, a w razie przedostania się do płuc uszkodzenia pęcherzyków płucnych oraz zmiany rakotwórcze [83]. Struktura habitatu powinna chronić załogę przed tego typu zagrożeniem. Okazuje się jednak, że pył księżycowy ma własności magnetyczne, można go więc usunąć wytwarzając pole magnetyczne w habitacie.

Na Marsie średnia temperatura wynosi -64 C , atmosfera składa się głównie z dwutlenku węgla, ciśnienie jest 100 razy mniejsze od ziemskiego, stała grawitacyjna wynosi 0.39 G. Podróż na Marsa będzie się odbywała z dużą prędkością. Ze względu na małą masę planety i rzadką atmosferę, wytracenie prędkości statku kosmicznego będzie bardzo trudne i kosztowne energetycznie. Odległość od Słońca powoduje, że do powierzchni Marsa dociera tylko 60 procent energii jaka dociera do Ziemi. Pogoda na Marsie sprzyja globalnym burzom piaskowym, powodując utrudnienie w produkcji energii elektrycznej z paneli fotowoltaicznych. Badania za pomocą spektrometrów promieniowania podczerwonego sugerują zawartość toksycznych składników w regolicie marsjańskim [84]. Wszystko to stanowi dla technologii habitatów kosmicznych.

Ad 3. Wyzwania behawiorystyczne i zdrowotne

a/ Przestrzeń osobista oraz prywatność są mocno ograniczone w pojazdach oraz stacjach kosmicznych. Na potrzeby planetarnych habitatów niezbędne jest zapewnienie optymalnych warunków dla załogi. Funkcjonowanie w grupie wymaga zapewnienia załodze przestrzeni prywatnych, również funkcje związane z higieną powinny być odpowiednio rozlokowane względem reszty funkcji. Temat ten poruszony zostanie w podrozdziale *Strefowanie funkcji*(4.2.2).

b/ Socjalna interakcja, izolacja, przestrzeń prywatna są obiektem badań lekarzy, psychologów oraz socjologów. Dynamika grupy oraz powodzenie misji opiera się na sprawnym działaniu, wykonywaniu zadań oraz szybkim rozwiązywaniu problemów. Problem interpersonalny na pokładzie może doprowadzić do zagrożenia misji i zdrowia załogi. Zasadnym wydaje się przytoczenie tutaj powszechnej opinii, że w każdym projekcie najsłabszym ogniwem pozostaje człowiek oraz błąd ludzki.

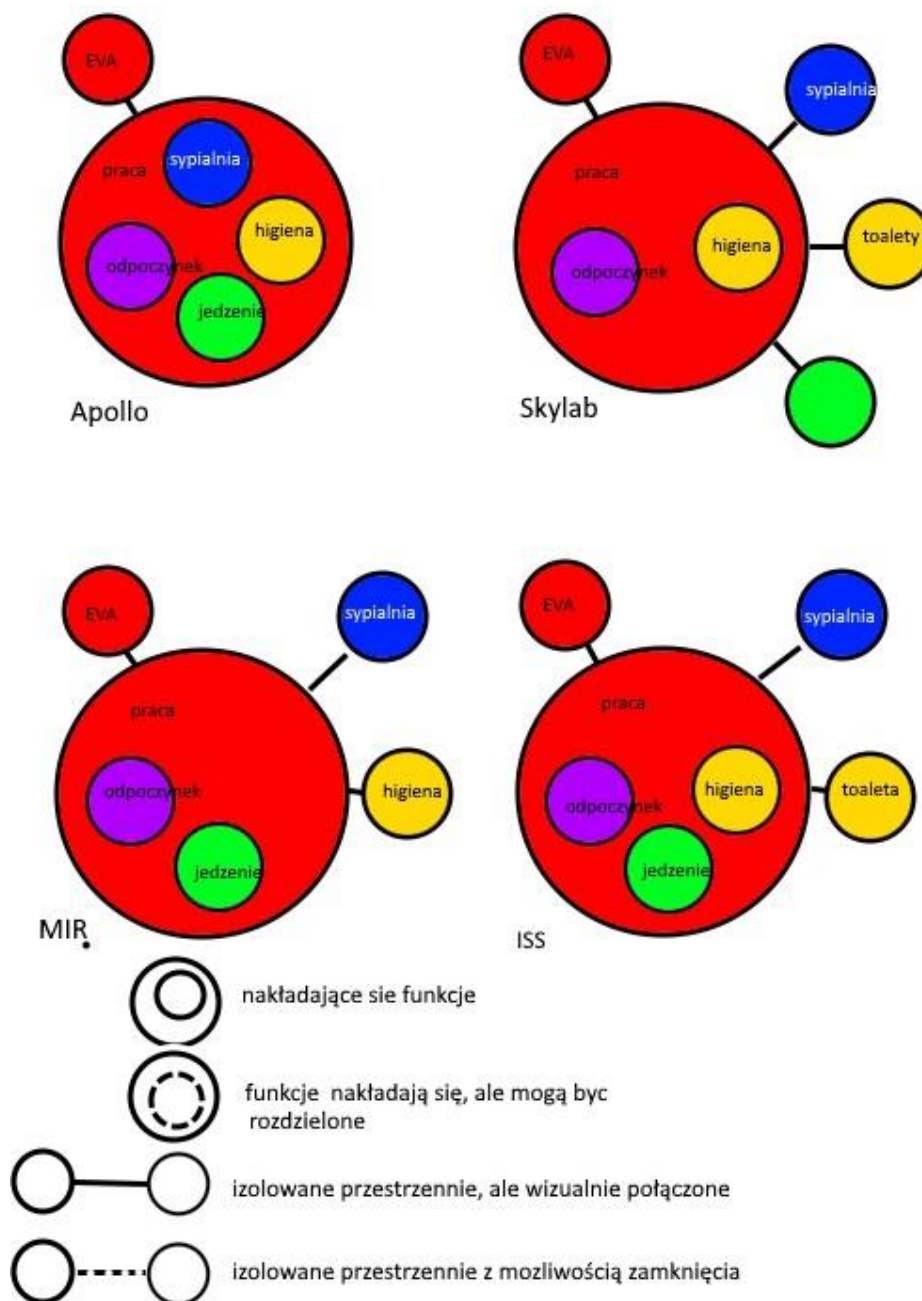
c/ Ochrona zdrowia i telemetria mają pomóc w utrzymaniu zdrowia załogi. Nawet z pozoru niewielkie problemy natury medycznej, jeśli dochodzi do nich na stacji kosmicznej mogą zagrażać życiu ludzkiemu [85], odbijają się też negatywnie na kondycji psychicznej załogi ¹². Ekspedycje na Księżyc lub Marsa będą wymagały obecności wyszkolonego personelu medycznego działającego samodzielnie lub przy ograniczonej pomocy centrum kontroli lotów.

4.2.2 Strefowanie funkcji

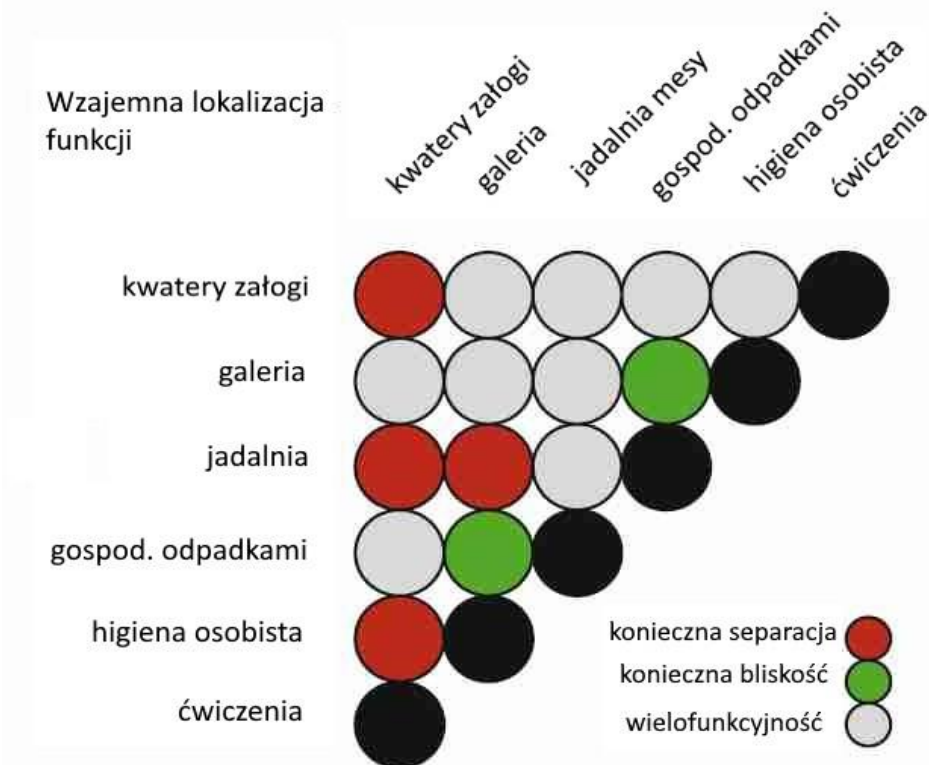
Nieodpowiednie rozłożenie funkcji w małej objętości pojazdu kosmicznego prowadzić może do znaczącego dyskomfortu załogi. Historycznie, wszystkie funkcje znajdowały się w jednym module.

¹²<https://screenrant.com/space-station-sabotage-iss-russia-nasa/>

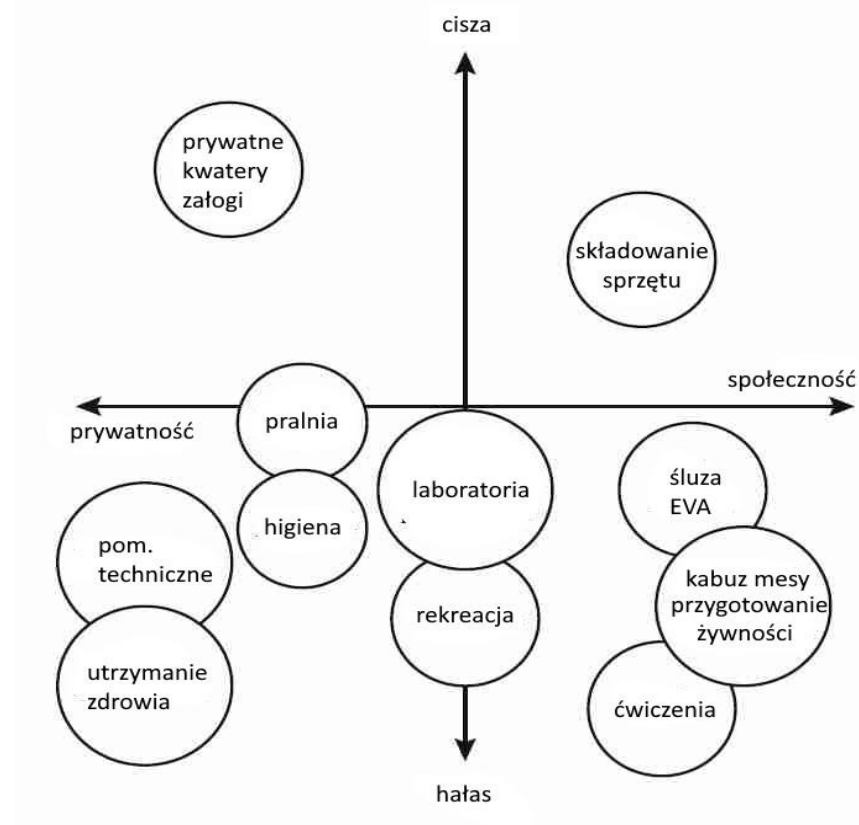
Dopiero podczas projektowania stacji kosmicznych zaczęto eksperymentować z odpowiednim rozmieszczeniem funkcji względem siebie. Schematy rozłożenia funkcji zostały opracowane na potrzeby książki „Space Architecture Education for Engineers and Architects – Designing and Planning Beyond Earth” [54] pokazując sposób w jaki historyczne oraz istniejące obiekty radziły sobie z ich rozlokowaniem (Rys.4.11).



Rysunek 4.11: Schematy rozłożenia funkcji w pojazdach kosmicznych, źródło: [54], tłumaczenie autora



Rysunek 4.12: Matryca strefowania oraz wydzielania funkcji, źródło: [54], tłumaczenie autora



Rysunek 4.13: Diagram przestrzeni indywidualnych - socjalnych oraz głośnych - cichych, źródło: [54], tłumaczenie autora

Funkcją nadrzędną obecnych pojazdów jest praca, i wszystkie inne funkcje analizowane były w zależności do tej nadrzędnej funkcji. Pozostałe analizowane funkcje to sen, higiena, jedzenie, wypoczynek oraz EVA (Extra-Vehicular Activity). Załogi kapsuł musiały sobie radzić z każdą potrzebą w jednej małej przestrzeni, długość ich misji nie przekraczały jednak kilku dni (tygodnia w przypadku misji Apollo). Na stacjach kosmicznych można było wydzielić przestrzeń prywatną na sypialnię, toaletę oraz czasem również na higienę, jak to było w przypadku stacji Skylab. Diagramy pozwalały również na określenie separacji wizualnej bądź jej braku i czy istniała możliwość obserwacji środowiska zewnętrznego. Brand N. Griffin przedstawił matrycę zależności w umiejscawianiu krytycznych funkcji mieszkalnych w kosmosie (Rys.4.12). Zawiera ona funkcje nie związane z pracą, ale z codziennym życiem załogi: kwatery, kuchnia, jadalnia, zarządzanie odpadami, higiena personalna oraz ćwiczenia. Podczas lokalizowania funkcji przydatny również staje się diagram podziału funkcji na indywidualne/socjalne oraz ciche/głośne (Rys.4.13). Z uwagi na charakterystykę statków kosmicznych oraz misji jedyną przestrzenią w pełni indywidualną oraz cichą są prywatne kwatery załogi.

Socjalną cichą przestrzenią określono magazyn sprzętu, co faktycznie ma potwierdzenie w praktyce. Na Międzynarodowej Stacji Kosmicznej załoga często używa najdalej położonego modułu ładunkowego jeśli potrzebują odbyć prywatną rozmowę, bądź potrzebują chwili spokoju od zgiełku stacji. Funkcje związane z pracą, czyli laboratoria, umiejscowiono blisko centrum diagramu kwalifikując ją jako funkcję hałaśliwą. Funkcje socjalne zakwalifikowane jako „głośne” były przypisane do śluzy, kuchni, jadalni oraz siłowni. Pozostałe funkcje takie jak higiena, naprawy, oraz funkcje medyczne oznaczone zostały określone jako indywidualne oraz średnio głośne lub ciche. Taka analiza rozłożenia funkcji może znacząco pomóc załodze w wspólnym przebywaniu na małej przestrzeni.

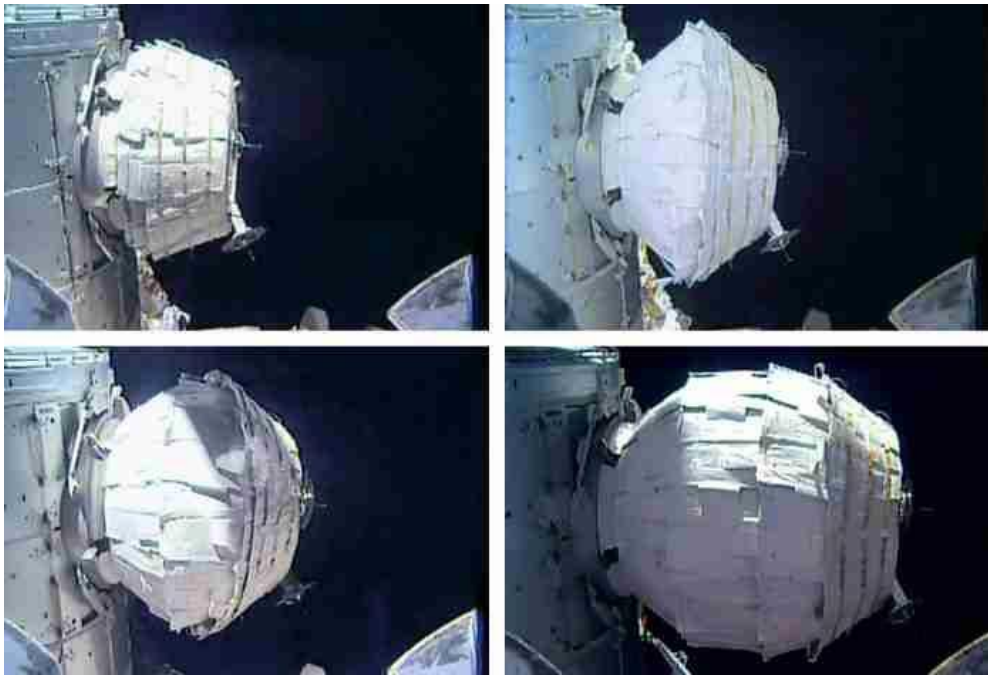
4.2.3 Typy konstrukcji dla kosmicznej architektury

Od samego początku aeronautyki pojazdy kosmiczne budowane są jako hermetyczne moduły zdolne do utrzymania wewnątrz ciśnienia oraz ochrony przed środowiskiem zewnętrznym. W miarę rosnącego skomplikowania misji kosmicznych oraz rosnącego zapotrzebowania na przestrzeń użytkową zaczęto te moduły łączyć tworząc większe struktury. Z uwagi na ograniczenia wynikające z logistyki kosmicznej nie jest opłacalne, a obecnie nawet nie jest możliwe wynoszenie na orbitę większych monolitycznych struktur stworzonych na Ziemi. Z tego też powodu „Space Architecture Education for Engineers and Architects - Designing and Planning Beyond Earth” podsumowuje obecnie używane metody konstrukcyjne jak i te rozważane na potrzeby przyszłej kosmicznej architektury [54]. Autorzy wyróżniają cztery typy konstrukcji: prefabrykaty, konstrukcje rozkładane, architektura hybrydowa, oraz technologia druku 3d. Autor dysertacji wyróżnia też kolejne dwa typy: struktury pochodzenia organicznego oraz wykorzystujące istniejące struktury geologiczne. Łącznie można zatem wyróżnić:

1. Prefabrykaty,
2. architektura rozkładana/nadmuchiwana,,
3. architektura hybrydowa
4. technologie przyszłości – druk 3d i struktury pochodzenia organicznego,
5. wykorzystanie naturalnie występujących struktur geologicznych.

Ad 1 Prefabrykaty są wyprodukowanymi na Ziemi aluminiowymi modułami lub ich elementami łączonymi ze sobą w miejscu docelowym. Zazwyczaj moduły są projektowane oraz wytwarzane tak by mogły stanowić względnie samodzielny pojazd, a po zadokowaniu były łączone do reszty modułów. Trwają prace nad technologiami pozwalającymi budować w kosmosie struktury za pomocą mniejszych elementów pozwalających dopiero tworzyć hermetyczną przestrzeń, wydaje się to jednak bardzo trudnym zadaniem, nieopłacalnym oraz ryzykownym dla stacji kosmicznych. Budowanie z kolei struktur z mniejszych elementów, na powierzchniach planet oraz księżyców, wydaje się coraz bardziej prawdopodobnym rozwiązaniem.

Ad 2. Architektura rozkładana/nadmuchiwana zdaje się atrakcyjnym rozwiązaniem biorąc pod uwagę ograniczenia logistyki kosmicznej, ponieważ potencjalnie pozwala przetransportować strukturę, która po rozłożeniu będzie miała dużą obojętność użytkową. Materiały dla różnych koncepcji różnią się znacznie: poczynając od rozkładanych teleskopowych modułów aluminiowych, poprzez wielowarstwowe kevlarowe namioty, czy nawet nadmuchiwane namioty betonowe (Rys.4.14, 4.15, 4.16).



Rysunek 4.14: Moduł BEAM, test na ISS, 2016, źródło [86]



Rysunek 4.15: Wizja nadmuchiwaných habitatów. Opracowanie zespołu Space is More pod kierownictwem autora, 2015 rok.



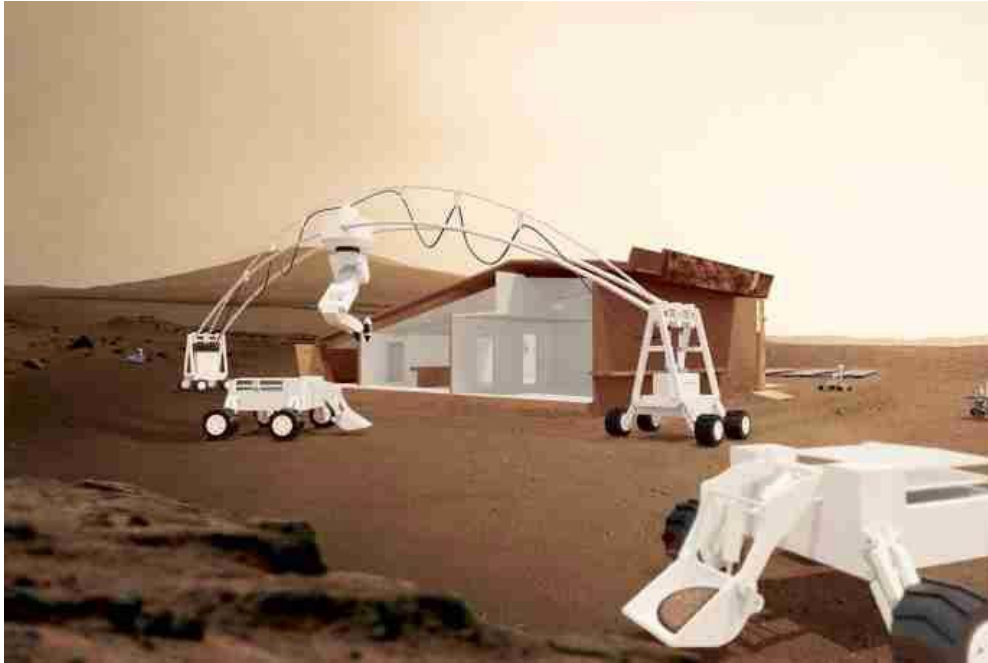
Rysunek 4.16: Wizja załogowego łazika z nadmuchiwaną nadbudową.
Opracowanie zespołu Space is More pod kierownictwem autora, 2019 rok

Ad 3. Architektura hybrydowa łączy ze sobą sztywne konstrukcje z rozkładanymi elementami zapewniającymi załodze bezpieczeństwo oraz funkcjonującą przestrzeń użytkową jeszcze przed rozłożeniem dodatkowej struktury. Przykładem takich koncepcji jest habitat analogowy HERA, jak również koncepcje habitatów księżycowych z okresu prezydencji Georga W. Busha

Ad 4. Technologie obecnie intensywnie rozwijane przez agencje kosmiczne wiążą się z drukiem 3d z materiałów dostępnych w pobliżu miejsca lądowania. Tworzenie struktur na miejscu bez potrzeby ich transportu z Ziemi mogą rozwiązać problem logistyki kosmicznej, zwłaszcza, kiedy placówka planuje się rozwijać w kierunku samowystarczalności. Stworzenie infrastruktury do tworzenia architektury poza Ziemią jest podstawowym wyzwaniem dla kolonizacji innych globów. Koncepcje skupiające się na tych metodach rozwijane były w ramach licznych programów badawczych NASA oraz ESA. Pierwszy drukowany habitat analogowy NASA, firmy ICON oraz biura architektonicznego BIG powstaje właśnie w Jonsons Space Center (Rys.4.17), prace prowadzą też inne zespoły (Rys.4.18).

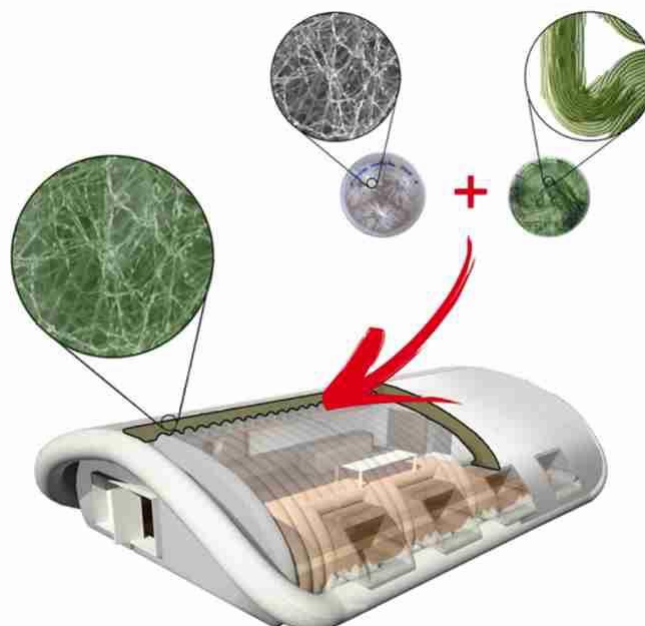


Rysunek 4.17: Mars Dune Alpha, źródło: [87]



Rysunek 4.18: Drukowany habitat na Marsie. Opracowanie zespołu Space is More pod kierownictwem autora, 2015 rok.

Zespoły naukowe pracują nad wykorzystywaniem struktur pochodzenia biologicznego, które można wytwarzać poza Ziemią. Badania nad „architekturą z grzybów” (Rys. 4.19) prowadzone w NASA Ames Center pod kierownictwem dr. Lynn Rothchilda [88]. W jednym z projektów autora wykorzystano przegrody wypełnione algami (Rys. 4.20) .



Rysunek 4.19: Myco–architektura, NASA Ames źródło: [89]



Rysunek 4.20: Wizja habitatu z przegrodami wypełnionymi algami. Opracowanie zespołu Space is More pod kierownictwem autora, 2018 rok.

Ad.5. Wykorzystanie naturalnie występujących struktur takich jak jaskinie, czy tunele lawowe rozważane jest od dawna. Warstwy skał stanowią świetną ochronę przed promieniowaniem, a uszczelnienie i zabezpieczenie wybranej sekcji struktury pozwalałoby na uzyskanie znacznej przestrzeni użytkowej [90]. Rozważa się sytuowanie przywiezionych modułów w takich strukturach, ale też odpowiednia modyfikacje terenu. Prace nad wykorzystaniem geometrii otwartego terenu w celu ochrony przed Słońcem mogą stać się podstawową praktyką kosmicznej urbanistyki (Rys. 4.21).

4.2.4 Typologia architektury kosmicznej

Ze względu na typ kosmicznej architektury wyszczególnia się pięć podstawowych rodzajów, różniących się sposobem ich użytkowania oraz projektowania [54]:

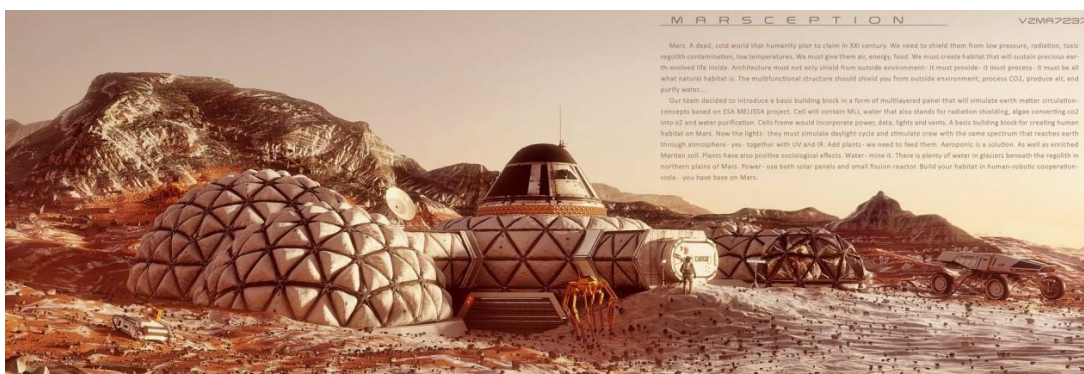
1. habitaty orbitalne,
2. habitaty planetarne,
3. habitaty mobilne oraz pojazdy powierzchniowe,
4. skafandry kosmiczne,
5. śluzy ciśnieniowe.



Rysunek 4.21: Wizja kolonii schowanej po zaciętej stronie zbocza. Opracowanie zespołu Space is More pod kierownictwem autora, 2019 rok.

Habitaty orbitalne, czyli stacje kosmiczne projektowane są dla środowiska mikrogravitacji. Jest to do tej pory jedyny istniejący przykład kosmicznej architektury pozwalający załodze na odbywanie długich misji kosmicznych.

Habitaty planetarne projektowane są dla charakterystyki docelowego środowiska. Przyszłe bazy księżycowe oraz marsjańskie są przykładem tego rodzaju architektury kosmicznej, ale warto pamiętać, że w najszerszym rozumieniu definicji, ziemski architektura oraz architektura podwodna również może być zaliczana do takiej architektury kosmicznej. Wyjątkowym przejawem tego rodzaju architektury kosmicznej są habitaty asteroidalne np. na księżycu Marsa – Fobosie. Znikoma grawitacja obiektu oraz dostęp do powierzchni wymusza podejście hybrydowe łączące projektowanie planetarne z orbitalnym (Rys. 4.22).



Rysunek 4.22: Marception, habitat planetarny. Opracowanie zespołu Space is More pod kierownictwem autora, 2019 rok.

Habitaty mobilne, oraz pojazdy powierzchniowe projektowane są jako maszyny służące do krótkotrwałych misji eksploracyjnych. Nie są planowane jako stałe miejsce do życia, a ich rozkład funkcji bardziej przypomina kapsułę kosmiczną (Rys. 4.23).



Rysunek 4.23: Habitat mobilny. Opracowanie zespołu Space is More pod kierownictwem autora, 2019 rok.

Skafandry kosmiczne często nazywane są indywidualnym statkiem kosmicznym, ponieważ umożliwiają przeżycie pojedynczemu członkowi załogi w niebezpiecznych warunkach próżni oraz trującej atmosferze (Rys. 4.24). Badania nad projektami nowych skafandrów są pracochłonne – obecne opóźnienia w produkcji nowych skafandrów przeznaczonych na misje księżycowe jest jednym z powodów opóźnienia powrotu ludzi na Srebrny Glob.



Rysunek 4.24: Analogowe skafandry kosmiczne. źródło: LunAres Research Station, prace własne

Śluzy ciśnieniowe są strukturą pośrednią między wnętrzem habitatu, a obcym środowiskiem. Projektowanie śluz ciśnieniowych dla habitatów planetarnych będzie kluczowym czynnikiem dla długotrwałych misji planetarnych. Lądownik księżycowy SM nie posiadał śluz, a cała przestrzeń lądownika podczas spacerów kosmicznych była rozhermetyzowana pozwalając na dostawanie się księżycowego pyłu do wnętrza modułu (Rys. 4.25).



Rysunek 4.25: Widok na służę projektu MaMBA. Opracowanie zespołu Space is More pod kierownictwem autora, 2018 rok.

4.2.5 Określanie gotowości technologicznej (TRL) architektury kosmicznej

W celu badań nad rozwojem projektów oraz prototypów z dziedziny kosmicznej architektury badacze z NASA oraz ESA zaadaptowali w 2008 roku skalę TRL (Technology Readiness Levels) zaproponowaną przez Mankinsa w roku 1995 [91]. Skala ta została stworzona do określenia gotowości technologii do wdrożenia, a następnie została zaadaptowana do większości dziedzin inżynierskich. Firmy oraz badacze wielokrotnie korzystają z tej skali dla określenia dojrzałości rozwiązań i na potrzeby dokumentacji oraz grantów badawczych. Skala została powszechnie zaakceptowana, jako jedno z kryteriów oceny projektów (używają ją też polskie instytucje takie jak NCBiR oraz NCN).

Etap I. Podstawowe badania technologii	TRL 1. Podstawowe założenia i obserwacje
Etap II. Dowód wykonalności	TRL 2. Koncepcja technologii i formalizacja zastosowań TRL 3. Teoretyczne i eksperymentalne dowodzenie działania technologii TRL 4. Walidacja w środowisku laboratoryjnym
Etap III. Rozwojowy	TRL 5. Walidacja w docelowym środowisku TRL 6. Demonstracja technologii w środowisku docelowym TRL 7. Prototyp demonstracyjny w środowisku odpowiadającym docelowemu.
Etap IV. Demonstracyjny	TRL 8. Demonstracja ostatecznej formy technologii TRL 9. Technologia gotowa do wdrożenia

Rysunek 4.26: Poziomy gotowości technologicznej, źródło: [91], tłumaczenie autora

Oryginalna skala TRL jest 9 stopniowa (Rys.4.26). Pierwszy etap skali o nazwie *Podstawowe Badania Technologii* zawiera TRL 1 opisujący podstawowe założenia oraz zaraportowane obserwacje. Drugi etap o nazwie *Dowód Wykonalności* zawiera trzy poziomy: TRL 2 o nazwie koncepcja technologii oraz formalizacja zastosowań, TRL 3 *Proof of Concept*, czyli analityczne oraz eksperymentalne dowodzenie działania technologii i TRL 4 – walidacja w środowisku laboratoryjnym.

Trzeci etap nosi nazwę *rozwojowego* i zawiera TRL 5 dotyczący walidacji w środowisku docelowym, TRL 6 – demonstracji technologii w środowisku docelowym, TRL 7 – test prototypu w środowisku podobnym do docelowego.

Ostatni etap zwany *demonstracyjnym* zawiera TRL 8 i 9. TRL 8 to demonstracja technologii do wdrożenia, TRL 9 to ostateczna technologia gotowa do wdrożenia posiadająca odpowiednie certyfikaty i testy i opisy rozruchowe co pozwala na dopuszczenie jej do użytku.

Publikacja Jana Connolly'ego i zespołu z NASA Johnson Space Center z roku 2006 [11] skupiła się na określeniu Poziomu Gotowości Technologicznej projektów przyszłych baz kosmicznych. Dla stworzenia w pełni funkcjonalnego habitatu docelowo znajdującego się poza Ziemią zaadaptowano skalę TRL (tab. 4.26). Pierwsze poziomy gotowości technologicznej skupiają się na opracowaniu założeń oraz koncepcji habitatu. Dla tej pracy najważniejsze są poziomy czwarty, piąty oraz szósty skupiające się na testach projektów stworzonych w pełnej skali o odmiennym zaawansowaniu integracji oraz doborze materiałów. Habitaty analogowe znajdują się będą w tym przedziale, jednak nie wszystkie. Nie każdy analogowy habitat kosmiczny był tworzony z myślą o rozwoju prototypu habitatu kosmicznego. Wiele z placówek powstało w celu symulowania takiej przestrzeni i przetestowania niektórych aspektów załogowej misji kosmicznej. Z analizy obiektów jasno wynika cel ich powstania i możliwość określenia ich HRL – Habitation Readiness Level (tab.4.27).

Etap I. Badania systemu habitatu	HRL 1. Czynniki ludzkie, system załogi, podtrzymanie życia związane z systemem załogi
Etap II. Koncepcyjna i funkcjonalna wykonalność	HRL 2. Koncepcja i konstrukcja habitatu, analiza funkcjonalności i zadań. HRL 3. Wewnętrzna konfiguracja, zdefiniowanie funkcji, schemat komunikacji, wykorzystanie modeli w zmniejszonej skali. HRL 4. Ocena modeli pełnoskalowych o niskiej wierności
Etap III. Przedstawienie technologii	HRL 5. Ocena modeli pełnoskalowych o dużej wierności dotycząca ludzi i warunków bytowania. HRL 6. Testy habitatów i ich rozmieszczenia w środowisku. HRL 7. Testy habitatu w warunkach zmiennego ciśnienia
Etap IV. Testowanie technologii i operacji technologicznych	HRL 8. Ukończenie rzeczywistego systemu i sprawdzenie możliwości do lotu kosmicznego HRL 9. Potwierdzenie przygotowania do lotu kosmicznego poprzez wielokrotne testy misji

Rysunek 4.27: Poziomy gotowości technologicznej w ujęciu habitatów kosmicznych (Habitation Readiness Level), źródło: [11], tłumaczenie autora

4.2.6 TRL dla modeli oraz symulatorów

Architekt kosmiczny Marc M.Cohen zaproponował w roku 2012 skalę TRL bezpośrednio skupiającą się na modelach projektowanych w celach naukowych oraz ćwiczebnych [92]. Skala jest sześciopoziomowa i pomija etapy wdrożeniowe technologii. Decyzja ta podyktowana była przede wszystkim argumentem, iż rozwój symulatorów kończy się na zapewnieniu możliwości testowych oraz treningowych w warunkach laboratoryjnych bądź polowych (tab. 4.28). Wedle cytowanej tabeli pierwszy poziom TRL zarezerwowany jest dla projektów koncepcyjnych oraz modeli w małej skali, określające wymiary konstrukcji.

Drugi poziom TRL zarezerwowany jest dla testowania założeń koncepcyjnych oraz eksperymentów architektonicznych. Poziom trzeci przechodzi w fazę testowania koncepcji w pełnej skali oraz pierwszych prób integracji projektu lub jego podsystemów. W czwartym poziomie gotowości technologicznej wg Cohena, po raz pierwszy wspomina się o testowaniu prototypu pod kątem operacyjnym, funkcjonalnym, integracji z systemami elektronicznymi oraz mechanicznymi i częściowej symulacji „lotu” (w rozumieniu symulacji misji). Habitat testowany jest w środowisku laboratoryjnym. Poziom piąty jest przeznaczony na zaawansowane testy koncepcji w środowisku operacyjnym posiadającym większość podsystemów w pełni zintegrowanych. Poziom szósty zarezerwowany jest dla habitatów będących symulatorami służącymi już jedynie treningowi oraz badaniom naukowym skupionym na użytkownikach. Obiekt jest gotowym, wysoce wyspecjalizowanym obiektem badawczym oraz testowym.

TRL	Opis ogólny	Specyfika makiety, atrybuty	Typowe materiały	uwagi
1	testowanie podstawowych założeń	projekt koncepcyjny dla sprawdzenia, że X może współpracować z Y & Z	plyty kartonowo-gipsowe, pianka, plyty wiórowe	modele w zmniejszonej skali zwykle działają równie dobrze, jak makiety w pełnej skali
2	formułowanie koncepcji, modelowanie, symulacja	kontrola zmiennych projektowych ze względu na ich wymiary	sklejka, plyty wiórowe, drewno	eksperymenty architektoniczne
3	dowód koncepcji	forma, dopasowanie, funkcja, operacje mechaniczne	Metal, plastik, drewno	faza integracji inżynierskiej
4	testy systemów/podukładów w warunkach laboratoryjnych	badania funkcjonalności i stosowalności	elektronika, systemy mechaniczne	zawiera częściową symulację lotu
5	testy podsystemów w odpowiednich warunkach	częściowe (krótkookresowe) testy warunków życia i pracy w habitatach	elektronika, systemy mechaniczne, kontrola atmosfery	zawiera symulację lotu
6	Test systemu w odpowiednich warunkach	Pełne testy warunków życia i pracy w habitatach	elektronika, systemy mechaniczne, kontrola atmosfery, kontrola ciśnienia	wierna symulacja misji

Rysunek 4.28: TRL dla makiet i symulatorów, źródło: [92], tłumaczenie autora

4.2.7 Technologie spin-in oraz spin-off

W przypadku technologii wykorzystywanych w przemyśle kosmicznym często również używa się określeń *spin-in* oraz *spin-off* [93]. Określenie *spin-off* odnoszą się do technologii stworzonych na potrzeby przemysłu kosmicznego, które potem zostały zaadaptowane przez przemysł codzienny. Przykłady takich technologii można znaleźć w wielu dziedzinach np. energetyce, materiałach, telekomunikacji, czy medycynie.

Rezonans magnetyczny, GPS, rzepy¹³ oraz technologia fotowoltaiczna to tylko kilka przykładów. W przypadku działań analogowych często testowane są technologie rozwijane na potrzeby załogowych misji, jako część ich rozwoju w ramach TRL. Niejednokrotnie jednak potem takie rozwiązania zostają również zaadaptowane do codziennego użytku – wtedy stają się technologiami typu spin-off. Wyróżnia się też technologie spin-in, czyli stworzone do codziennego użytku, ale z powodzeniem zaadaptowane do zastosowań kosmicznych. Przykładami takich technologii są Kevlar oraz żywność liofilizowana. W kontekście badań analogowych bardzo często wykorzystuje się ziemskie zamienniki technologii zastępujące w dostatecznym stopniu drogą technologię na potrzeby symulacji misji. Dla analogowych habitatów kosmicznych technologie typu spin-in pozwalają na znaczne ograniczenia kosztów budowy placówek, które nie mają być w założeniu prototypem technologicznym habitatu kosmicznego, czyli nie mają na celu rozwijania poziomu TRL lub HRL, a jedynie emulować odpowiednie przestrzenie i funkcje wymagane przez symulacje. W dalszych analizach ocenione zostaną typy opisywanych placówek, jako analogowe bądź analogiczne oraz wyróżnione będą rozwiązania typu spin-in oraz spin-off, jako określenie czy dane działania lub technologie zaprojektowane zostały na potrzeby przemysłu kosmicznego czy zostały zaadaptowane z innych dziedzin.

4.3 Ergonomia: analizy NASA ergonomii historycznych pojazdów kosmicznych

Międzynarodowy program kosmicznych lotów załogowych stanowi ciągły eksperyment, którego celem jest umożliwienie egzystencji ludziom poza ich naturalnym habitatem (Ziemią) przez coraz dłuższe okresy.

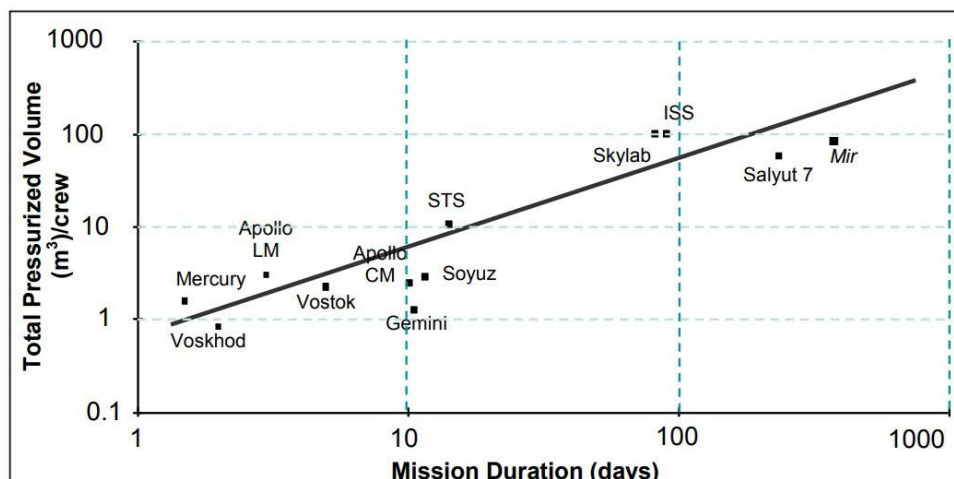
Jednym z najważniejszych dokumentów z zakresu projektowania przestrzeni dla astronautów jest NASA Human Integration Design Handbook w swojej najnowszej wersji z 2014 roku [94], w którym zebrano informacje o fizjologii człowieka w kosmosie oraz o podsystemach, jakie projektuje się w oparciu o opracowane standardy. Jeden z rozdziałów skupia się na doświadczeniach związanych z komfortem pracy załogi we wnętrzu obiektów kosmicznych. Tam też znalazło się zastawienie przedstawiające zależność między objętością wnętrza pojazdu kosmicznego w przeliczeniu na osobę oraz długością misji (Rys. 4.29). Z analiz wysunięto wnioski, że objętość użytkowa w metrach sześciennych może być szacowana na podstawie długości misji wedle wzoru:

$$v = 6,67 \ln(t) - 7,79. \quad (4.2)$$

gdzie v – objętość w m^3 , t – czas misji w dniach

Tak więc, w tym rozumieniu przykładowe wartości objętości przestrzeni życiowej dla misji załogowych przedstawiają się następująco: – objętość przestrzeni życiowej na członka załogi dla misji 180 dniowej = 26,86 m^3 , – objętość przestrzeni życiowej na członka załogi dla misji 7 dniowej = 5,19 m^3 .

¹³taśma typu Velcro z rzepami



Rysunek 4.29: Użytkowa objętość pojazdów kosmicznych, źródło: [95]

Daje to wartość wstępną, którą można modyfikować ze względu na charakter misji oraz jej potrzeby. Warto zauważyć, że wnioski te biorą się z analizy istniejących i historycznych pojazdów, a nie badań teoretycznych. Analizy mają charakter informacyjny dla przyszłych projektantów, ale nie były tworzone jako norma projektowa.

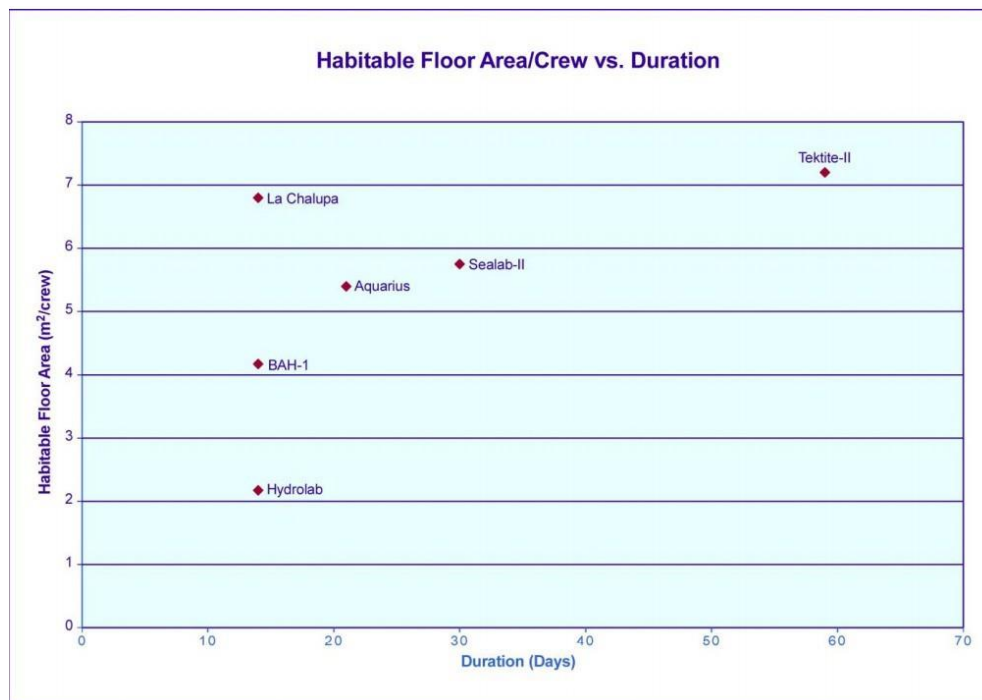
Rysunek 4.30 przedstawia powierzchnię użytkową stacji podwodnych jako analogii do stacji planetarnych. Dane te można wykorzystać dla środowiska grawitacji ziemskiej, marsjańskiej oraz księżycowej niemalże w stosunku jeden do jednego. Podawany jest argument, że jeśli tylko odległość między stojącym człowiekiem i sufitem jest dostosowana do panującej grawitacji powierzchnia zajmowana przez jednego człowieka jest taka sama. Analiza była przeprowadzona dla baz podwodnych.

Z uwagi na brak danych o misjach laboratoriów podwodnych dłuższych niż 59 dni habitatu Tektite-II, autorzy przestrzegają przed ekstrapolacją danych poza ten okres. Korelacja między powierzchnią przypadającą na jednego członka załogi i długością misji jest następująca:

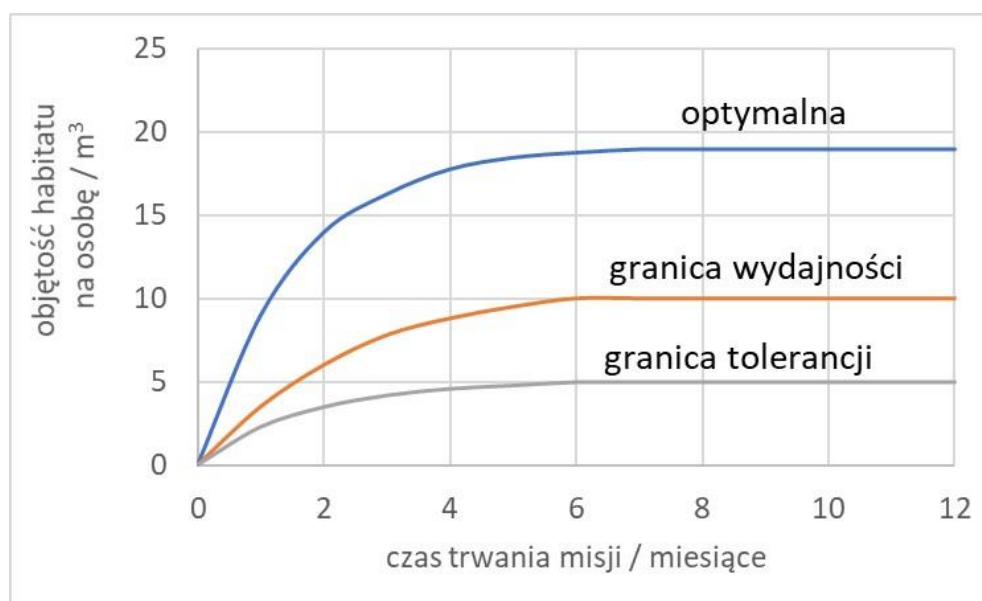
$$s = 2.77 \ln(t) - 1.83. \quad (4.3)$$

gdzie s – powierzchnia w m^2 , t – czas misji w dniach.

Równie ważną informacją jest zależność między przestrzenią życiową i długością misji decydujących o komforcie załogi i możliwości wykonania określonych zadań. W dokumencie NASA-STD-3001 [96] znajduje się obszerne opracowanie danych fizjologicznych odnośnie tego jak człowiek przystosowuje się do nieważkości oraz innego środowiska pod kątem medycznym. Wnioski dotyczące ergonomii również rozpatrywane są jedynie pod kątem człowieka, a nie urządzeń i przestrzeni. Jednym z niewielu aspektów, które bezpośrednio można odnieść do architektury była po raz kolejny zależność pomiędzy objętością pojazdu w przeliczeniu na członka załogi względem długości misji – tym razem jednak z określonymi poziomami komfortu (Rys. 4.31). Dane dotyczące komfortu zostały uzyskane na podstawie wywiadów z załogą.



Rysunek 4.30: Wykres przestrzeni użytkowej na członka załogi w bazach podwodnych, źródło: [95]



Rysunek 4.31: Zależność kubatury użytkowej od długości misji, źródło: [95], tłumaczenie autora

Wykres na rysunku 4.31 pokazuje, że optymalną objętością przypadającą na jednego członka załogi dla misji do długości 12 miesięcy jest ok. 20 m³, objętością wystarczającą by załoga mogła wykonywać sprawnie swoje prace jest 10 m³, natomiast minimalną tolerowaną objętością jest 5 m³. Nie było jednak jeszcze misji kosmicznej, która zmuszałaby astronautów, aby przebywali w objętości 10 m³ na osobę dłużej niż 17 dni, co oznacza, że szacunki mogą nie być dokładne.

5 Przegląd oraz analiza wybranych przykładów analogowych habitatów kosmicznych

W poprzednim rozdziale wskazano możliwe sposoby analizy analogowych habitatów kosmicznych. W obecnym rozdziale podczas analizy wybranych habitatów, zwrócona będzie uwaga na te cechy, które wyróżniają architekturę kosmiczną i decydują stopniu gotowości technologicznej.

Starano się, aby opis habitatów był ujednoczony, uwzględniający rok powstania, lokalizację i funkcję otoczenia, w którym znajduje się habitat, jego formę geometryczną oraz układ i funkcje. Badane habitaty zostały uporządkowane chronologicznie. Opisy i rysunki związane z tymi obiektami umożliwiają lepsze zrozumienie ich charakterystyk i cech, które są następnie prezentowane w tabelach. Na początku pierwszej tabeli przypisanej do habitatu przedstawiono następujące dane:

- rok powstania,
- inwestor,
- projektant,
- lokalizacja,,
- otoczenie,
- funkcja otoczenia w kontekście celu powstania obiektu.

Trzy następne segmenty tabeli są poświęcone cechom technologicznym, operacyjnym i naukowym badanych obiektów. Taki podział wynika z klasyfikacji rodzajów działań analogowych zdefiniowanych na Rys. 3.1. Powyższy podział działań analogowych jest również oparty na informacjach zawartych w podrozdziale 4.1.2, Architektura misji, czyli planowanie misji kosmicznych. Przyjęta metoda umożliwia skuteczne porównanie cech obiektów, które są istotne w kontekście astronautyki.

Do cech technologicznych zalicza się cechy charakterystyczne dla architektury kosmicznej opisanej w rozdziale 4.2 (forma i funkcja – badanie architektury kosmicznej), a także cechy określające ich konstrukcję i stopień zaawansowania technologicznego. Na tej podstawie definiowano poziomy odwzorowania wierności (ang. fidelity) jako niską (Low Fidelity – LF), średnią (Medium Fidelity – MF) i wysoką (High Fidelity – HF) wierność, które reprezentują ogólną ocenę cech technologicznych, naukowych i operacyjnych.

W kwestii cech technologicznych, dla opisywanych obiektów starano się dążyć do określenia:

- typologii architektury kosmicznej, zgodnie z podrozdziałem 4.2.4,
- systemu konstrukcyjnego, zgodnie z podrozdziałem 4.2.3
- wyzwań środowiskowych, którym musi sprostać placówka, zgodnie z podrozdziałem 4.2.1,
- typu konstrukcji spin-in i spin-off, z podrozdziału 4.2.7,
- poziomu gotowości technologicznej (TRL) w kontekście habitatów kosmicznych, zgodnie z podrozdziałem 4.2.5,
- TRL dla modeli i symulatorów, z podrozdziału 4.2.6,
- oceny jakości wykonania,
- informacji o użytych materiałach,
- poziomu wierności docelowym rozwiązaniom kosmicznym.

Cechy operacyjne obejmują informacje dotyczące liczby członków załogi, liczby przeprowadzonych analogowych symulacji misji, a także średniej długości trwania tych symulacji. Ponadto, uzupełniono te dane o aktualny status aktywności, intensywność prowadzonych działań oraz jakość realizowanych symulacji i operacji. Kompletując cechy operacyjne, uwzględniono informacje o charakterze działań analogowych oraz poza-analogowych, co pozwala określić, jak efektywnie wykorzystywane jest miejsce działania. Na podstawie tych informacji, dokonano ponownej oceny poziomów odwzorowania wierności, co reprezentuje ogólną ocenę cech operacyjnych placówki. Cechy operacyjne według definicji autora obejmują:

- liczbę członków załogi,
- szacunkową liczbę analogowych testów i symulacji misji,
- średnią długość trwania testów i symulacji,
- aktualny status aktywności placówki,
- intensywność prowadzonych działań w placówce,
- działania analogowe i poza-analogowe,
- poziom odwzorowania wierności.

W kontekście cech naukowych, skupiono się na identyfikacji dyscyplin naukowych oraz obszarów badawczych, do których placówka jest wykorzystywana. Wśród głównych obszarów badań wyróżniono zagadnienia technologiczne z zakresu astronautyki i inżynierii systemów, czynniki ludzkie, medycynę ekstremalną, a także biotechnologię obejmującą systemy podtrzymywania życia i produkcję żywności. Następnie oszacowano ilość dostępnych publikacji naukowych wynikających z tych działań oraz oceniono ich jakość poprzez analizę indeksu *impact factor* czasopism naukowych, w których zostały opublikowane. Na podstawie tych informacji dokonuje się kolejnej oceny poziomów odwzorowania wierności, reprezentującej ogólną ocenę cech naukowych placówki. Cechy naukowe według definicji autora obejmują:

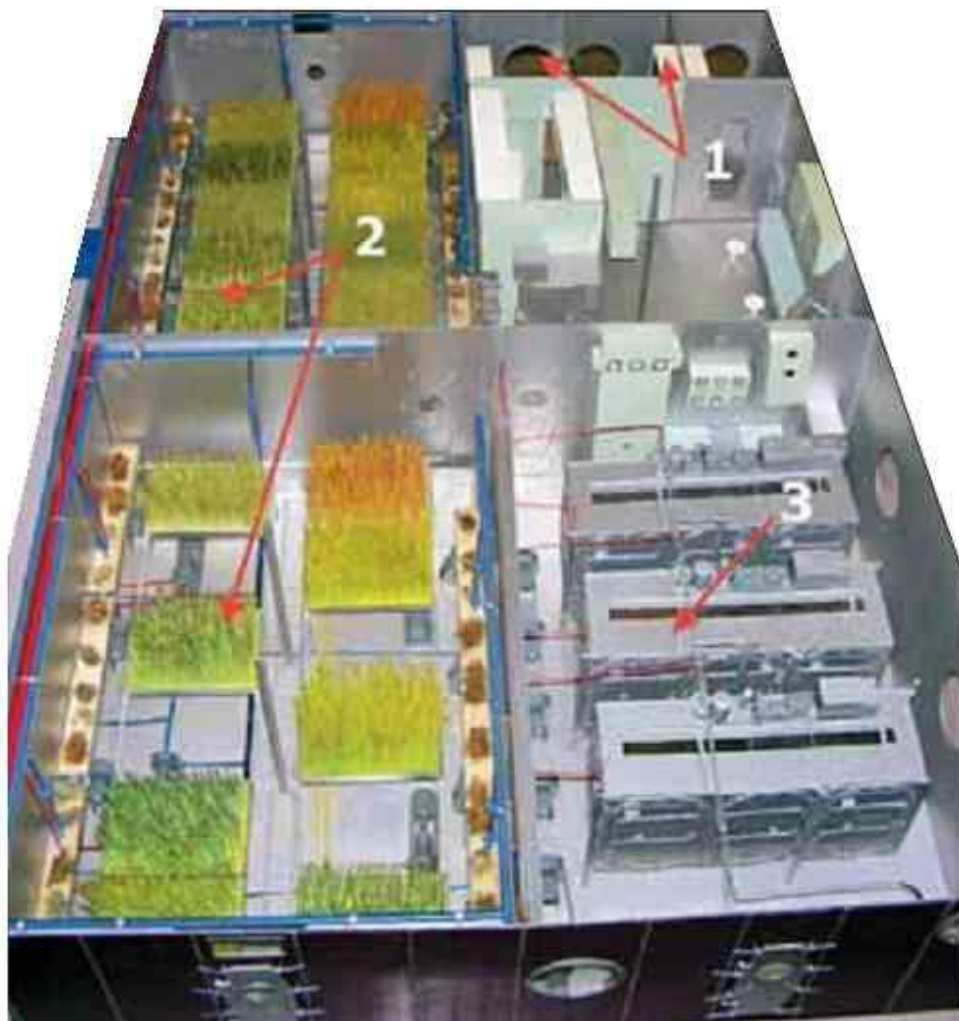
- dyscypliny naukowe i obszary badań,
- liczbę dostępnych publikacji,
- jakość dostępnych publikacji,
- poziom odwzorowania wierności.

W kolejnym fragmencie omówiono formę analogowych habitatów kosmicznych, zaczynając od typu logistycznego (modularny, monolityczny, mieszany). Kolejno identyfikowane były typy form przestrzennych występujące w obiekcie, odnosząc się do form geometrycznych, z których składają się omawiane AHK. Następnie, na podstawie dostępnych rzutów, określono układ funkcjonalny jako planarny, horyzontalny, wertykalny lub liniowy. Dodatkowo, analizowano informacje o infrastrukturze towarzyszącej i o otaczającym terenie.

Po podsumowaniu informacji dotyczących cech analogowych habitatów kosmicznych, opracowano tabele zawierające szacowane metraże i objętości przestrzeni użytkowej omawianych obiektów, opartych na analizie dostępnych w literaturze rzutów i ilustracji. Dane te są uzupełniane w rozdziale 4.3.

5.1 Bios-3

Eksperyment zamkniętego obiegu materii powstawał od 1965 roku w Krasnojarskim Instytucie Biofizyki w Rosji. Placówka była zaprojektowana dla badań upraw żywności oraz cyrkulacji powietrza z planowaną trzyosobową załogą [63, 97, 98]. Ukończono ją w roku 1972 i do roku 1984 przeprowadzono tam 10 symulacji. Od 1991 roku placówka przeszła pod zarząd Międzynarodowego Centrum Zamkniętych Ekosystemów, a od roku 2005 kontynuuje badania przy współpracy z Europejską Agencją Kosmiczną. Placówka podziemna znajduje się w mieście Krasnojarsku. Odizolowanie od środowiska zewnętrznego jest częścią eksperymentu i podstawowym założeniem. Podziemna stalowa struktura o wymiarach 14 m na 9 m i wysokości 2,5 m podzielona została na cztery równe pomieszczenia. Pomieszczenie załogi mieści 3 oddzielne kajuty, jadalnię z aneksem kuchennym, łazienkę oraz pokój kontrolny. Pozostałe pomieszczenia zostały przeznaczone pod uprawę żywności. W pierwszych latach jedno z nich mieściło farmę alg mających odpowiadać za produkcję tlenu z dwutlenku węgla.



Rysunek 5.1: BIOS-3, źródło: [97]



Rysunek 5.2: Habitat Bios-3. Graficzna prezentacja powierzchni przypadającej na określone funkcje

Determinanty w kształtowaniu formy analogowych habitatów kosmicznych

nazwa: Bios-3

<i>rok powstania</i>	<i>inwestor</i>	<i>projektant</i>
1972	ZSRR	-
<i>lokalizacja:</i>	<i>środowisko:</i>	<i>funkcja środowiska:</i>
Krasnojarsk, Rosja	ekstremalne: izolacja	izolacja

Cechy technologiczne:

<i>typ architektury:</i>	<i>system konstrukcyjny:</i>	<i>wyzwania środowiskowe:</i>
Planetarna		Systemy podtrzymywania życia, wyzwania behawioralne
<i>typ konstrukcji:</i>	<i>HRL:</i>	<i>TRL dla symulatorów:</i>
spin-off	-	6
<i>jakość wykonania:</i>	<i>użyte materiały:</i>	<i>poziom wierności:</i>
umiarkowana	stal	MF

Cechy operacyjne:

<i>liczność załogi:</i>	<i>liczba misji:</i>	<i>dni misji: średnio/maks.</i>
0	4	45/ 45
<i>status aktywności:</i>	<i>intensywność aktywności:</i>	<i>poziom wierności:</i>
placówka w użyciu do 2019	sporadyczne testy	HF
<i>działania analogowe:</i>	<i>działania poza analogowe:</i>	
analogowe symulacje misji/testy analogowe/testy technologii/prowadzenie badań/zbieranie danych w trybie ciągłym	trening ludzki	

Cechy naukowe:

<i>dyscyplina i obszar działalności:</i> nauki planetarne/ medycyna ekstremalna i kosmiczna/ psychologia i socjologia/ systemy podtrzymania życia/ produkcja żywności/ biotechnologia/		
<i>liczba publikacji:</i>	<i>jakość publikacji:</i>	<i>poziom wierności:</i>
umiarkowana	umiarkowana	HF

Forma:

<i>typ logistyczny:</i>	<i>formy geometryczne:</i>	<i>układ:</i>
monolityczny	graniastosłup	planarny
<i>forma przestrzenna:</i>	<i>infrastruktura:</i>	<i>teren:</i>
wielościanny	zabudowania techniczne, teleskopy	-

Tabela 5.1: Dane dotyczące Bios-3a

nazwa: Bios-3

typ: Habitat

ilość misji	A[m ²]	V[m ³]	załoga	m ² /os	m ³ /os		
10	126	346.5	4	31.5	86.62		
			L[m]	W[m]	H[m]	A[m ²]	V[m ³]
Habitat						126	346.5
Moduł załogowy			7	4.5	2.5	31.5	78.75
Moduł Systemów Podtrzymywania Życia			7	4.5	2.5	31.5	78.75
Moduł Upraw Hydroponicznej 1			7	4.5	2.5	31.5	78.75
Moduł Upraw Hydroponicznej 2			7	4.5	2.5	31.5	78.75

Typ funkcji	A[m ²]	A/os.[m ²]
komunikacja	18.9	4.72
życie	26.78	6.69
praca	28.35	7.09
podsystemy	51.98	12.99
suma	126	31.5

Tabela 5.2: Dane dotyczące habitatu Bios-3 – ciąg dalszy. Oznaczenia użyte w tabeli: A – powierzchnia, V – objętość, L – długość, W – szerokość, H – wysokość. Takie samo jest znaczenie wymienionych symboli w pozostałych tabelach obecnego rozdziału.

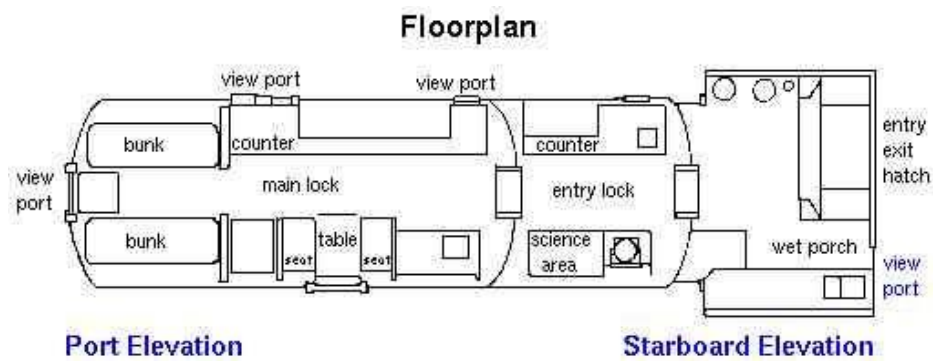
5.2 Aquarius Reef Base

Podwodny habitat Aquarius Reef Base powstał w roku 1989 w ramach projektu Narodowej Agencji Oceanów i Atmosfery (NOAA) [99-101]. Od 2014 roku operatorem i właścicielem placówki jest Florida International University, która kontynuuje program w ramach Medina Aquarius Program¹. Badania w habitacie skupiają się na ochronie środowiska dna morskiego oraz raf koralowych. Placówka jest regularnie wynajmowana przez NASA i ESA w celach przeprowadzania analogowych misji kosmicznych oraz treningowych misji z udziałem astronautów w ramach programu NEEMO. W latach 2001-2021 zorganizowano 22 misje treningowe jako część badań oraz treningu przed załogowymi lotami na Międzynarodową Stację Kosmiczną. W roku 2019 odbyła się misja Europejskiej Agencji Kosmicznej organizowana przez Europejskie Centrum Astronautów w Kolonii przy współpracy z firmą Comex mająca na celu trening głębinowy i badania psychologiczne na zespole żeńskim. Habitat znajduje się 19 m pod powierzchnią Oceanu Spokojnego w pobliżu głębinowej rafy Conch. Środowisko podwodne jest wykorzystywane przez NASA oraz ESA jako analog obcego środowiska kosmicznego z obniżoną grawitacją wymagającą skafandra z prostym systemem podtrzymywania życia. Na konstrukcję habitatu składają się dwa osobne elementy - stalowa rama przytwierdzona do dna morskiego oraz stalowy zbiornik ciśnieniowy habitatu. Zbiornik habitatu posiada wzmacniające żebra stalowe. Podczas podwodnej ekspedycji w habitacie utrzymywane jest ciśnienie w od 1,5 do 2,6 atmosfery z możliwością przeprowadzenia stopniowej dekompresji przed powrotem na powierzchnię. Habitat podłączony jest do stacji powierzchniowej w celu wymiany gazowej oraz dostarczania energii. Wewnątrz istnieje możliwość monitorowania poziomu tlenu, dwutlenku węgla, temperatury oraz wilgotności. Habitat ma formę horyzontalnej kapsuły - zbiornika ciśnieniowego. Wewnątrz znajdują się trzy segmenty (strefy) oddzielone włazami: strefę mokrą, strefę wejściową oraz strefę życiową. Strefa mokra jest głównym wejściem do habitatu i posiada ciśnienie odpowiadające ciśnieniu wody na danej głębokości wynoszącemu 2,6 atm. Pozwala to na istnienie tzw. mokrej werandy(wet porch) oznaczającej otwór w podłodze bezpośrednio prowadzący na zewnątrz habitatu. Strefa wejściowa jest najmniejszym wydzielonym segmentem, który służy, jako śluza powietrzna do utrzymywania ciśnień pomiędzy segmentami. W tym segmencie znajduje się proste laboratorium oraz toaleta. Największy segment stanowi strefa życiowa. W niej znajduje się przestrzeń wspólna z aneksem kuchennym oraz stołem, spiżarnią oraz osobne pomieszczenie z łózkami załogi mogące pomieścić 6 łóżek na trzech poziomach. Habitat posiada kilka małych bulajów.

¹<https://environment.fiu.edu/aquarius/>



Rysunek 5.3: Aquarius Reef Base, źródło: [99]



Rysunek 5.4: Aquarius Reef Base, źródło: [99]



Rysunek 5.5: Aquarius Reef Base, źródło: [99]

Determinanty w kształtowaniu formy analogowych habitatów kosmicznych

nazwa: Aquarius

<i>rok powstania</i>	<i>inwestor</i>	<i>projektant</i>
1986	NOAA	-
<i>lokalizacja:</i>	<i>środowisko:</i>	<i>funkcja środowiska:</i>
wybrzeże Florydy, USA	ekstremalne: podwodne	prawdziwe środowisko ekstremalne

Cechy technologiczne:

<i>typ architektury:</i>	<i>system konstrukcyjny:</i>	<i>wyzwania środowiskowe:</i>
Planetarna, Mobilna/Pojazd, Skafander Kosmiczny		Systemy podtrzymywania życia, Zagrożenia środowiskowe, wyzwania behawioralne, spacery kosmiczne
<i>typ konstrukcji:</i>	<i>HRL:</i>	<i>TRL dla symulatorów:</i>
spin-in	7	6
<i>jakość wykonania:</i>	<i>użyte materiały:</i>	<i>poziom wierności:</i>
Wysoka	Stal	HF

Cechy operacyjne:

<i>liczność załogi:</i>	<i>liczba misji:</i>	<i>dni misji: średnio/maks.</i>
0	60	1.06/ 1.06
<i>status aktywności:</i>	<i>intensywność aktywności:</i>	<i>poziom wierności:</i>
placówka w użyciu	regularne misje analogowe	HF
<i>działania analogowe:</i>	<i>działania poza analogowe:</i>	
analogowe symulacje misji/testy analogowe / testy technologii / zarządzanie misją / prowadzenie badań / zbieranie danych w trybie ciągłym	edukacja i popularyzacja nauki/trening ludzki/działalność komercyjna	

Cechy naukowe:

<i>dyscyplina i obszar działalności:</i> nauki planetarne/ ISRU/ spacery kosmiczne i EVA/ medycyna ekstremalna i kosmiczna/ psychologia i socjologia/ IT i telemetria/ testy wyposażenia/		
<i>liczba publikacji:</i>	<i>jakość publikacji:</i>	<i>poziom wierności:</i>
umiarkowana	wysoka	HF

Forma:

<i>typ logistyczny:</i>	<i>formy geometryczne:</i>	<i>układ:</i>
monolityczny	cylinder	horyzontalny
<i>forma przestrzenna:</i>	<i>infrastruktura:</i>	<i>teren:</i>
bryły obrotowe		pod wodą

Tabela 5.3: Dane dotyczące Aquarius Reef Base

nazwa: Aquarius

typ: Habitat

ilość misji	A[m ²]	V[m ³]	załoga	m ² /os	m ³ /os
40	32.5	71.5	6	5.42	11.92

	L[m]	W[m]	H[m]	A[m ²]	V[m ³]
Habitat				32.5	71.5
Habitat wewnątrz			2.2	32.5	71.5
<i>Sypialnia</i>			2.2	5.6	12.32
<i>Przestrzeń dzienna</i>			2.2	10.8	23.76
<i>Laboratorium/toaleta</i>			2.2	7	15.4
<i>Wyłaz i przestrzeń mokra</i>			2.2	9.1	20.02

Typ funkcji	A[m ²]	A/os.[m ²]
komunikacja	4.68	.78
życie	11.6	2.9
praca	10.76	2.69
podsystemy	5.46	1.36
suma	32.5	8.12

Tabela 5.4: Aquarius Reef Base – część dalsza tabeli



Rysunek 5.6: Aquarius Reef Base. Graficzna prezentacja powierzchni przypadającej na poszczególne funkcje

5.3 FMARS

Flashline Mars Arctian Research Station (FMARS) [102–105] powstał z inicjatywy Roberta Zubrina oraz The Mars Society w roku 2000². Głównym sponsorem była firma Flashline, od której stacja nosi swoją nazwę. Habitat został zaprojektowany przez dwóch architektów – Kurta Mincheels’a oraz Wayne’a Cassalls’a. Struktura i funkcja jest bliźniacza do MDRS powstałego rok później na pustyni w Utah. Różnica jednak jest w jakości, konstrukcji oraz w użytych materiałach. Kompozytowa powłoka tworzona na zamówienie oraz detale wykończenia zdecydowanie przewyższają obiekt z Utah (tworzony w oparciu o projekt FMARS, jednak bez pomocy twórców). Stacja sporadycznie przyjmuje załogi analogowe z uwagi na wysokie koszty ekspedycji. FMARS umiejscowiony jest na grani Hayens górującej nad kraterem Haughtona na wyspie Devon w Kanadzie. Podobnie jak w przypadku Haughton Mars Project³ lokalizacja jest atrakcyjna z uwagi na geologię oraz małą erozję krateru uderzeniowego. Struktura habitatu jest stworzona z kompozytu z włókna szklanego o wewnętrznej strukturze plastra miodu. Cylinder podzielony jest na 8 wertykalnych wycinków cylindra spotykających się w kluczu sklepienia Habitat posiada formę wertykalnego cylindra o średnicy 8,3 m oraz wysokości 7,7 m. Podzielony jest na dwa poziomy. Pierwszy zawiera dwie śluzy, pomieszczenie na skafandry, toaletę oraz duże pomieszczenie warsztatowo-robotyczne. Poziom drugi zawiera 6 kajut oraz przestrzeń wspólną z aneksem kuchennym i miejscami do spożywania posiłków.



Rysunek 5.7: FMARS, źródło: [106]

²<http://fmars.marsociety.org/>, dostęp grudzień 2022

³Haughton Mars Project nie został tutaj opisany ze względu na brak danych dotyczących jego struktury, wielkości i konstrukcji.

nazwa: F-Mars

<i>rok powstania</i>	<i>inwestor</i>	<i>projektant</i>
2000	The Mars Society	-
<i>lokalizacja:</i>	<i>środowisko:</i>	<i>funkcja środowiska:</i>
Ziemia Baffina, Kanada	ekstremalne: arktyczne	prawdziwe środowisko ekstremalne

Cechy technologiczne:

<i>typ architektury:</i>	<i>system konstrukcyjny:</i>	<i>wyzwania środowiskowe:</i>
Planetarna		Zagrożenia środowiskowe, wyzwania behawioralne
<i>typ konstrukcji:</i>	<i>HRL:</i>	<i>TRL dla symulatorów:</i>
spin-off	-	5
<i>jakość wykonania:</i>	<i>użyte materiały:</i>	<i>poziom wierności:</i>
umiarkowana		MF

Cechy operacyjne:

<i>liczność załogi:</i>	<i>liczba misji:</i>	<i>dni misji: średnio/maks.</i>
0	12	14/ 60
<i>status aktywności:</i>	<i>intensywność aktywności:</i>	<i>poziom wierności:</i>
placówka w użyciu	sporadyczne misje analogowe	MF
<i>działania analogowe:</i>		<i>działania poza analogowe:</i>
analogowe symulacje misji/testy analogowe / zarządzanie misją / prowadzenie badań		trening ludzki/działalność komercyjna

Cechy naukowe:

<i>dyscyplina i obszar działalności:</i> nauki planetarne/ ISRU/ spacery kosmiczne i EVA/ medycyna ekstremalna i kosmiczna/ psychologia i socjologia/		
<i>liczba publikacji:</i>	<i>jakość publikacji:</i>	<i>poziom wierności:</i>
umiarkowana	umiarkowana	MF

Forma:

<i>typ logistyczny:</i>	<i>formy geometryczne:</i>	<i>układ:</i>
monolityczny	cylinder	wertykalny
<i>forma przestrzenna:</i>	<i>infrastruktura:</i>	<i>teren:</i>
bryły obrotowe	brak	lodowa pustynia

Tabela 5.5: Dane dotyczące FMARS

nazwa: FMARS

typ: Habitat

ilość misji	A[m ²]	V[m ³]	załoga	m ² /os	m ³ /os
250	85.5	256.5	6	14.25	42.75

	L[m]	W[m]	H[m]	A[m ²]	V[m ³]
Habitat				85.5	256.5
Cylinder habitatu	8	8	6	85.5	256.5
Poziom 1			3	36.9	110.7
<i>Laboratorium</i>			3	21	63
<i>Śluzy</i>			3	4.7	14.1
<i>Łazienka</i>			3	5	15
<i>Warsztat</i>			3	6.2	18.6
Poziom 2			3	48.6	145.8
<i>Kuchnia/pracownia</i>			3	25.8	77.4
<i>Pokoje</i>			3	22.8	68.4

Typ funkcji	A[m ²]	A/os.[m ²]
komunikacja	10.72	1.79
życie	42.88	10.72
praca	27.2	6.8
podsystemy	4.7	1.18
suma	85.5	21.38

Tabela 5.6: dane dotyczące habitatu FMARS – kontynuacja tabeli



Rysunek 5.8: Ilustracja graficzna powierzchni przypadającej na poszczególne funkcje habitatu FMARS

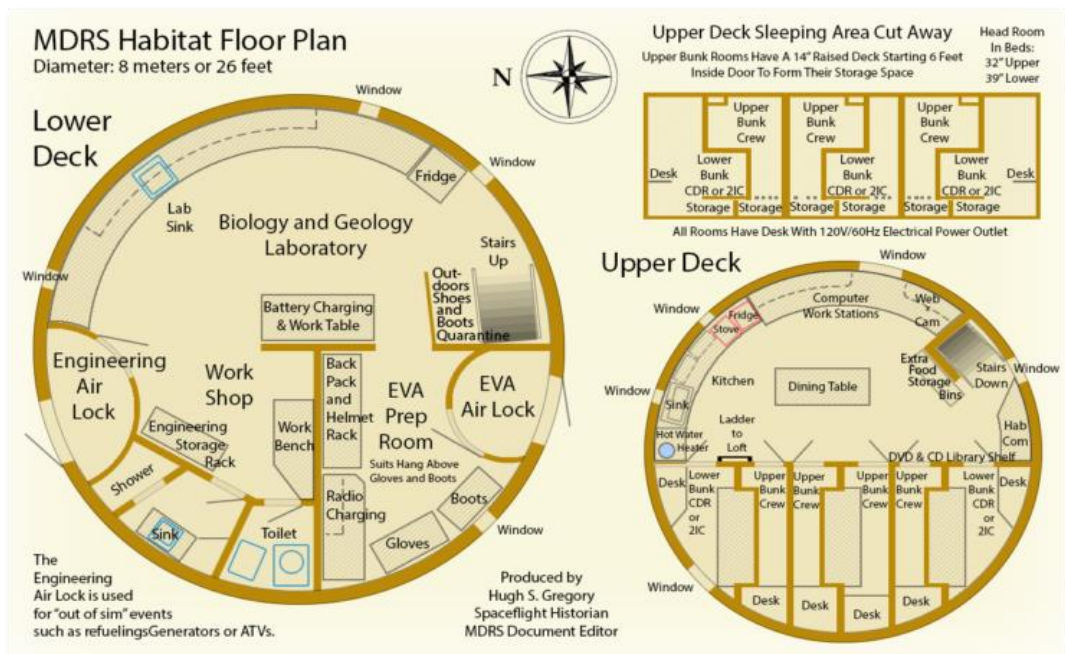
5.4 Mars Desert Research Station (MDRS)

Stacja Mars Desert Research Station (MDRS) powstała w 2001 roku z ramienia organizacji The Mars Society kierowanej przez dr. Roberta Zubrina [107–111]. Nazwę można przetłumaczyć, jako *Pustynna Marsjańska Placówka Badawcza*. Jest to habitat analogowy z największą liczbą przeprowadzonych sesji symulujących załogową misję. Jednocześnie jest to placówka, która już w momencie swojego utworzenia budziła zastrzeżenia, co do zastosowanych rozwiązań oraz wyposażenia. W ciągu ostatnich dwudziestu lat rozrosła się o dodatkowe laboratoria. MDRS prowadzi głównie badania geologiczne oraz badania z zakresu procedur przeprowadzania spacerów kosmicznych. Placówka nie posiada systemów do automatycznego zbierania danych o stanie zdrowia załogi [112]. Wszelkie badania medyczne oraz psychologiczne wykonywane są przez załogę w formie aktywnych wywiadów lekarskich bądź papierowych formularzy. MDRS znajduje się na pustynnym terenie nieopodal miasta Hanksville w stanie Utah w Stanach Zjednoczonych [55]. Lokalizacja, zwłaszcza w okresie letnim, wykazuje topograficzne zbieżności z krajobrazem powierzchni planety Mars. Główny habitat powstał z drewnianej konstrukcji szkieletowej. Warstwy zewnętrzne zrobione są z płyt OSB w białej okleinie. Wewnątrz konstrukcji znajduje się izolacja wykonana z 20 cm wełny mineralnej. Kopuła warsztatowa jest prostą geodezyjną konstrukcją stalową z membranowym okryciem z PVC. Szklarnia posiada drewniany stelaż pokryty panelami z pleksi. Systemy i wykonanie MDRS są niskiej jakości, a opracowania naukowe wskazują duże nieścisłości [113].

Zespół habitatu składa się z kilku odrębnych struktur. Najstarszą i zarazem najważniejszą strukturą jest dwukondygnacyjny wertykalny cylinder o średnicy 8 metrów. Wewnątrz na parterze znajdują się przestrzenie operacyjne oraz higieniczne. Dwa wyjścia posiadają wiatrołapy symulujące śluzy pozwalające utrzymać teoretyczne ciśnienie wewnątrz struktury. Na tym poziomie znajduje się pomieszczenie do zakładania skafandrów i przygotowania spacerów kosmicznych (EVA Prep Room), mały zespół higieniczny, warsztat oraz otwarta przestrzeń służąca za laboratorium biologiczno–geologiczne. Na kolejnym piętrze znajdują się funkcje związane ze spożywaniem posiłków oraz sześć małych pokoi prywatnych dla załogi. Pozostałe zabudowania kampusu MDRS to kopuła obserwatorium astronomicznego, pięciometrowa kopuła warsztatu, oraz szklarnia o szerokości 2,5 m i długości 6 m. Obserwatorium astronomiczne jest kopułą o średnicy 2 m mieszcząca dwa niewielkie teleskopy. Obserwatorium zostało ufundowane przez Elona Muska. Szklarnia spłonęła w roku 2014 – obecnie jest odbudowana.



Rysunek 5.9: MDRS, źródło: [108]



Rysunek 5.10: MDRS -rzut, źródło: [108]

nazwa: MDRS

<i>rok powstania</i>	<i>inwestor</i>	<i>projektant</i>
2001	the Mars Society	-
<i>lokalizacja:</i>	<i>środowisko:</i>	<i>funkcja środowiska:</i>
Hanksville, Utah, USA	ekstremalne: pustynia	testy terenowe

Cechy technologiczne:

<i>typ architektury:</i>	<i>system konstrukcyjny:</i>	<i>wyzwania środowiskowe:</i>
Planetarna , Skafander Kosmiczny		Zagrożenia środowiskowe, wyzwania behawioralne, spacer kosmiczne
<i>typ konstrukcji:</i>	<i>HRL:</i>	<i>TRL dla symulatorów:</i>
spin-off	-	5
<i>jakość wykonania:</i>	<i>użyte materiały:</i>	<i>poziom wierności:</i>
Niska: przestarzała		MF

Cechy operacyjne:

<i>liczność załogi:</i>	<i>liczba misji:</i>	<i>dni misji: średnio/maks.</i>
0	260	14/ 180
<i>status aktywności:</i>	<i>intensywność aktywności:</i>	<i>poziom wierności:</i>
placówka w użyciu	regularne misje analogowe	MF
<i>działania analogowe:</i>	<i>działania poza analogowe:</i>	
analogowe symulacje misji/prowadzenie badań	edukacja i popularyzacja nauki / działalność komercyjna	

Cechy naukowe:

<i>dyscyplina i obszar działalności:</i> nauki planetarne/ spacer kosmiczny i EVA/ medycyna ekstremalna i kosmiczna/ psychologia i socjologia/		
<i>liczba publikacji:</i>	<i>jakość publikacji:</i>	<i>poziom wierności:</i>
wysoka	umiarkowana	MF

Forma:

<i>typ logistyczny:</i>	<i>formy geometryczne:</i>	<i>układ:</i>
monolityczny, mieszany	kopuła, cylinder, graniastosłup	wertykalny, planarny
<i>forma przestrzenna:</i>	<i>infrastruktura:</i>	<i>teren:</i>
bryły obrotowe	teleskop, dodatkowe zabudowania	teren pustynny

Tabela 5.7: Dane dotyczące MDRS

nazwa: MDRS

typ: Habitat

ilość misji	A[m ²]	V[m ³]	załoga	m ² /os	m ³ /os
250	171.32	388.2	6	28.55	64.7

	L[m]	W[m]	H[m]	A[m ²]	V[m ³]
Habitat				171.32	388.2
Cylinder habitatu	8	8	6	85.5	256.5
Poziom 1			3	36.9	110.7
<i>Laboratorium</i>			3	21	63
<i>Śluzy</i>			3	4.7	14.1
<i>Łazienka</i>			3	5	15
<i>Warsztat</i>			3	6.2	18.6
Poziom 2			3	48.6	145.8
<i>Kuchnia/pracownia</i>			3	25.8	77.4
<i>Pokoje</i>			3	22.8	68.4
Obserwatorium	2	2	3	12.56	37.68
Kopuła Warsztatu	6	6	3	28.26	56.52
Korytarze				30	
Szklarnia	6	2.5	2.5	15	37.5

Typ funkcji	A[m ²]	A/os.[m ²]
komunikacja	35	5.83
życie	53.6	13.4
praca	70.46	17.62
podsystemy	12.56	3.14
suma	171.62	42.9

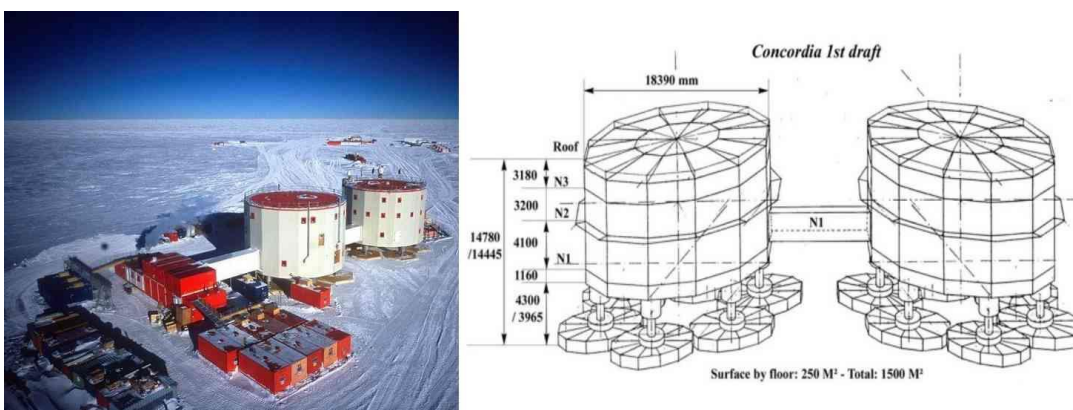
Tabela 5.8: Dane dotyczące MDRS – część dalsza tabeli



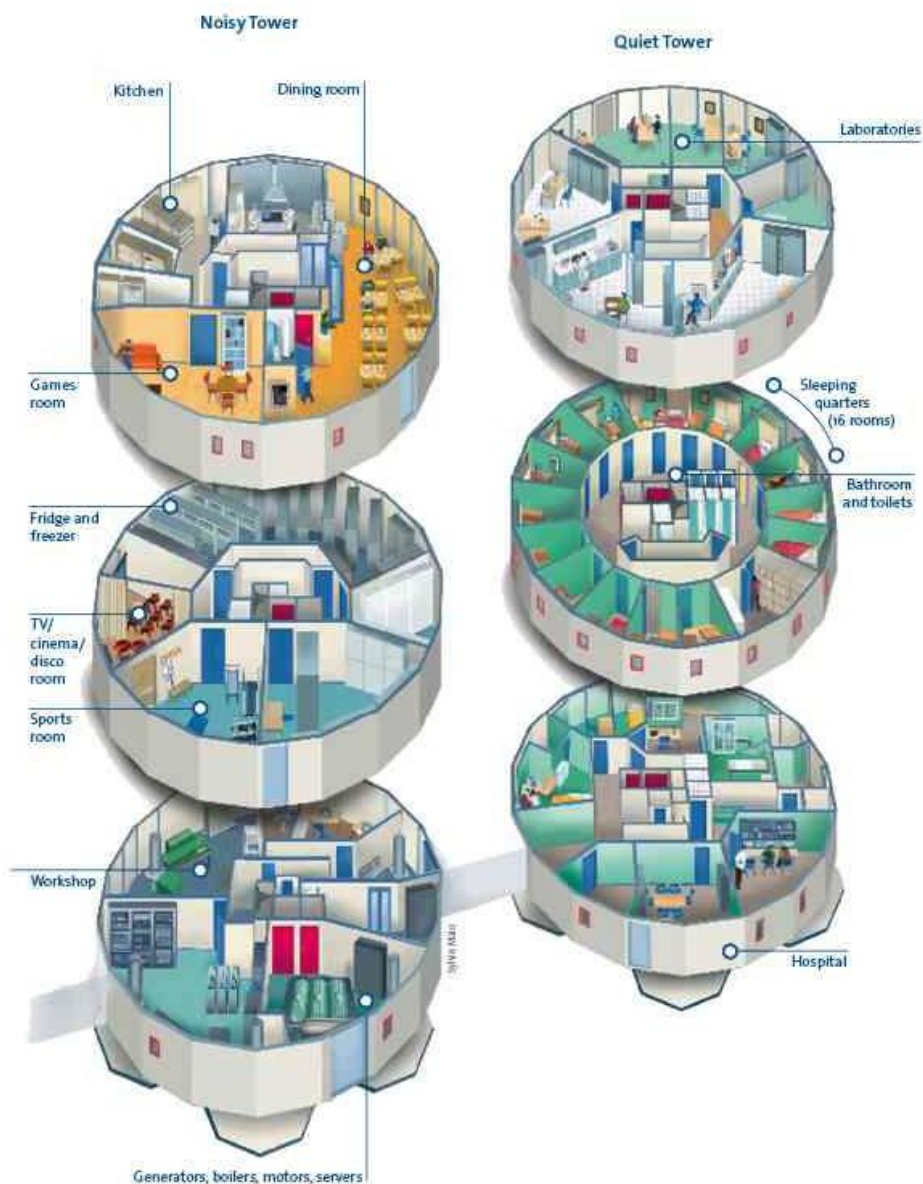
Rysunek 5.11: Graficzne przedstawienie powierzchni przypadającej na określoną funkcję w MDRS

5.5 Stacja Concordia

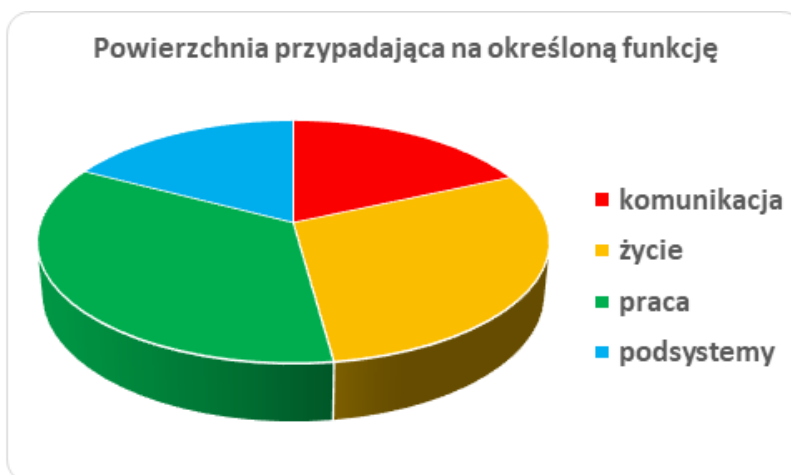
Stacja Concordia została założona w roku 2005 przez rządy Francji i Włoch [114–120]. Znajduje się na Płaskowyżu Polarnym na Antarktydzie. Załoga placówki liczy między 14 a 16 osób i składa się głównie z obywateli państw konsorcjum. Stacja prowadzi badania z zakresu astronomii, klimatu, glaciologii, zdrowia i psychiki. Stacja jest oddalona od innych stacji o 1100 km od innych stacji badawczych. Stacja znajduje się na Płaskowyżu Polarnym w rejonie Dome C, będącym jednym z najzimniejszych miejsc na Ziemi. W lecie temperatura nie wzrasta powyżej -25 stopni Celsjusza, natomiast zimą w czasie nocy polarnej może spaść nawet do -80 stopni Celsjusza. Dome C znajduje się na wysokości 3233 m n.p.m. Wieże zbudowane są ze stalowej konstrukcji szkieletowej. Elewacja składa się z 20 izolowanych paneli na każdym poziomie. Podziały wewnętrzne zostały wykonane w technologii szkieletowej. Cała stacja została umieszczona na stalowym stelażu i podniesiona względem terenu. Główne zabudowania stacji to dwie wieże o wysokości 12 m i średnicy 18,5 m, każda posiadająca trzy poziomy. Wieże dzielą się ze względu na umiejscowione w nich funkcje na wieżę cichą oraz głośną. Pierwszy poziom wieży „cichej” zawiera oprócz komunikacji oraz przejść do wieży głośnej część szpitalną oraz biurową. Szpital pozwala przeprowadzić operacje, posiada gabinet dentystyczny oraz izolatkę. Poziom drugi zawiera 16 kajut, pion sanitarny oraz składzik. Ostatni poziom zawiera laboratoria. Wieża ma około 3200 metry kwadratowe powierzchni użytkowej. Pierwszy poziom wieży „głośnej” zawiera warsztaty oraz pomieszczenie generatorów jak również pomieszczenia techniczne. Drugi poziom przeznaczony jest na siłownię, spiżarnio-chłodnię oraz małe kino. Poziom trzeci zawiera kuchnię, stołówkę oraz salę gier. Obie wieże mają w przybliżeniu taką samą powierzchnię użytkową bliską 6500 m^2 .



Rysunek 5.12: Stacja Concordia, źródło: [121]



Rysunek 5.13: Stacja Concordia źródło: [121]



Rysunek 5.14: Graficzne przedstawienie powierzchni przypadających na określoną funkcję w Stacji Concordia

nazwa: Concordia

<i>rok powstania</i>	<i>inwestor</i>	<i>projektant</i>
2005	IPEV z Francji oraz Włoskie PNRA	-
<i>lokalizacja:</i>	<i>środowisko:</i>	<i>funkcja środowiska:</i>
Dome C na płaskowyżu Antarktydy Wschodniej	ekstremalne: arktyczne	prawdziwe środowisko ekstremalne

Cechy technologiczne:

<i>typ architektury:</i>	<i>system konstrukcyjny:</i>	<i>wyzwania środowiskowe:</i>
Planetarna		Zagrożenia środowiskowe, wyzwania behawioralne
<i>typ konstrukcji:</i>	<i>HRL:</i>	<i>TRL dla symulatorów:</i>
spin-in	-	5
<i>jakość wykonania:</i>	<i>użyte materiały:</i>	<i>poziom wierności:</i>
Wysoka		HF

Cechy operacyjne:

<i>liczność załogi:</i>	<i>liczba misji:</i>	<i>dni misji: średnio/maks.</i>
12	12	365/ 365
<i>status aktywności:</i>	<i>intensywność aktywności:</i>	<i>poziom wierności:</i>
placówka w użyciu	stałe użycie	LF
<i>działania analogowe:</i>	<i>działania poza analogowe:</i>	
przewodzenie badań	trening ludzki	

Cechy naukowe:

<i>dyscyplina i obszar działalności:</i> nauki planetarne/ medycyna ekstremalna i kosmiczna/ psychologia i socjologia/ systemy podtrzymania życia/ produkcja żywności/ biotechnologia/		
<i>liczba publikacji:</i>	<i>jakość publikacji:</i>	<i>poziom wierności:</i>
umiarkowana	wysoka	HF

Forma:

<i>typ logistyczny:</i>	<i>formy geometryczne:</i>	<i>układ:</i>
monolityczny	cylinder	wertykalny
<i>forma przestrzenna:</i>	<i>infrastruktura:</i>	<i>teren:</i>
bryły obrotowe	zabudowania techniczne, teleskopy	lodowa pustynia

Tabela 5.9: Dane dotyczące Stacji Concordia

Determinanty w kształtowaniu formy analogowych habitatów kosmicznych

nazwa: Stacja Concordia

typ: Habitat

ilość misji	A[m ²]	V[m ³]	załoga	m ² /os	m ³ /os
27	1612	4835.99	13	124	372

	L[m]	W[m]	H[m]	A[m ²]	V[m ³]
Habitat				1612	4835.99
Wieża Cicha	18.5		12	806	2418
Poziom 1	18.5		3	268.67	806
<i>Komunikacja</i>				48.36	
<i>Szpital</i>				134.33	
<i>Biura</i>				85.97	
Poziom 2	18.5		3	268.67	806
<i>Komunikacja</i>				45.67	
<i>Kajuty załogi</i>				161.2	
<i>Łazienka</i>				29.55	
<i>Składzik</i>				32.24	
Poziom 3	18.5		3	268.67	806
<i>Komunikacja</i>				67.17	
<i>Laboratoria</i>				201.5	
Wieża Głośna	18.5		12	806	2418
Poziom 1	18.5		3	268.67	806
<i>Komunikacja</i>				48.36	
<i>Biura</i>				59.11	
<i>Pom. Techniczne</i>				161.2	
Poziom 2	18.5		3	268.67	806
<i>Komunikacja</i>				42.99	
<i>Spiżarnia/Chtłodnia</i>				118.21	
<i>Sport</i>				40.3	
<i>Kino</i>				67.17	
Poziom 3	18.5		3	268.67	806
<i>Komunikacja</i>				42.99	
<i>Kuchnia</i>				80.6	
<i>Jadalnia</i>				107.47	
<i>Pokój gier</i>				37.61	

Typ funkcji	A[m ²]	A/os.[m ²]
komunikacja	295.53	22.73
życie	475.54	118.88
praca	561.51	140.38
podsystemy	279.41	69.85
suma	1612	403

Tabela 5.10: Stacja Concordia – dalsza część danych

5.6 IBMP

Instytut Biomedycznych Problemów Rosyjskiej Akademii Nauk (IBMP) stworzył na potrzeby programu Mars500 habitat analogowy o kontrolowanym środowisku wewnętrznym [122–126]. Celem programu było przeprowadzić pełną dwuletnią symulację załogowej misji na Marsa, której większą część zajmowałaby podróż w obie strony. Projekt odbywał się między 2007, a 2011 rokiem. Obecnie placówka wykorzystywana jest w kolejnych symulacjach – np. księżycowych.

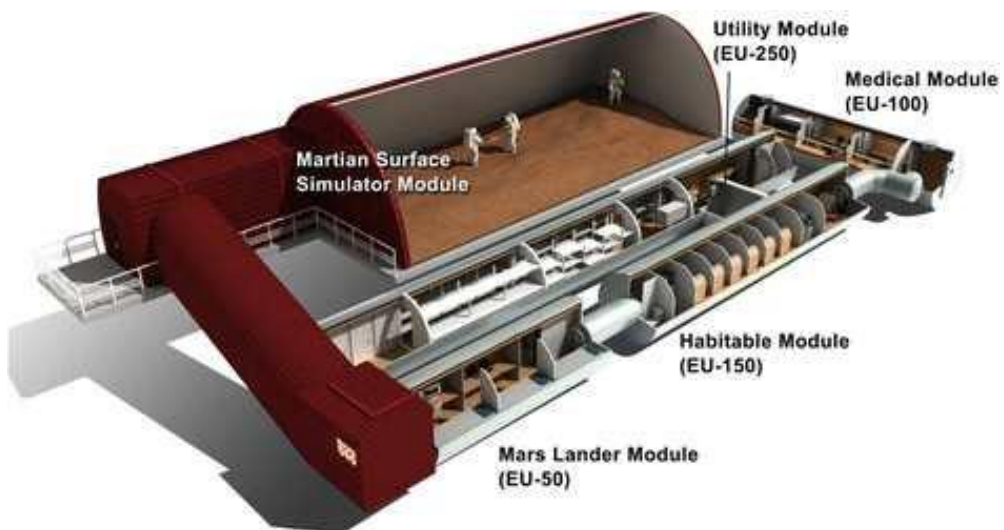
Instytut Biomedycznych Problemów Rosyjskiej Akademii Nauk znajduje się w Moskwie. Sam habitat znajduje się wewnątrz hali, będąc kolejnym przykładem analogowego habitatu znajdującego się w kontrolowanych warunkach.

Placówka składa się z czterech aluminiowych cylindrów oraz hali do symulacji spacerów kosmicznych. Wewnętrzne podziały modułów wykonane są w lekkich technologii drewnianej w całości pokrytej listwami drewnianymi. Moduły są uszczelnione z kontrolowanym ciśnieniem oraz zamkniętym układem obiegu powietrza.

Na habitat IBMP składa się pięć modułów: 4 horyzontalne walce połączone śluzami, oraz moduł eksploracyjny symulujący 40 metrów kwadratowych powierzchni Marsa. Moduły przeznaczone do codziennego użytku zostały nazwane od swej objętości. Cylindry mają średnicę 3,3 metra oraz długość zróżnicowaną pod potrzeby strefowania funkcji. Najkrótszy moduł EU-50 o długości 6 metrów w czasie misji używany jest sporadycznie i służy, jako symulator pojazdu transferowego na powierzchnię Marsa. Przeznaczony jest dla trojki załogi posiadając małą łazienkę, trzy prycze i mały aneks kuchenny. Moduł EU-50 połączony jest z modułem mieszkalnym EU-150 o długości 20 metrów. W tym module znajduje się łazienka, sześć koi, kuchnia oraz salon do spędzania czasu wolnego. Z modułu mieszkalnego można się dostać do dwóch pozostałych modułów: EU-100 oraz EU-250. Moduł EU-100 to moduł medyczno-laboratoryjny. Znajduje się tam gabinet lekarski i pomieszczenie zabiegowe. Moduł EU-250 mieści funkcje gospodarcze w postaci magazynu, chłodni oraz siłowni. Całość habitatu to 210 m² na które składają się moduły oraz 40 m² powierzchni symulacji Marsa.



Rysunek 5.15: Habitat Mars500 IBMP, źródło: [127]



Rysunek 5.16: Habitat Mars500 IBMP, źródło: [127]



Rysunek 5.17: Habitat Mars500 IBMP, źródło: [127]

nazwa: IBMP

<i>rok powstania</i>	<i>inwestor</i>	<i>projektant</i>
2006	IBMP	-
<i>lokalizacja:</i>	<i>środowisko:</i>	<i>funkcja środowiska:</i>
Moskwa, Rosja	ekstremalne: izolacja	izolacja

Cechy technologiczne:

<i>typ architektury:</i>	<i>system konstrukcyjny:</i>	<i>wyzwania środowiskowe:</i>
Orbitalna, Planetarna , Mobilna/Pojazd, Śluza, Skafander Kosmiczny		Systemy podtrzymywania życia, wyzwania behawioralne, spacer kosmiczne , Inżynieria systemów
<i>typ konstrukcji:</i>	<i>HRL:</i>	<i>TRL dla symulatorów:</i>
spin-off	5	5
<i>jakość wykonania:</i>	<i>użyte materiały:</i>	<i>poziom wierności:</i>
wysoka		HF

Cechy operacyjne:

<i>liczność załogi:</i>	<i>liczba misji:</i>	<i>dni misji: średnio/maks.</i>
0	15	60/ 530
<i>status aktywności:</i>	<i>intensywność aktywności:</i>	<i>poziom wierności:</i>
placówka w użyciu	coroczne misje analogowe	HF
<i>działania analogowe:</i>	<i>działania poza analogowe:</i>	
analogowe symulacje misji/ testy analogowe / zarządzanie misją / prowadzenie badań/zbieranie danych w trybie ciągłym	trening ludzki	

Cechy naukowe:

<i>dyscyplina i obszar działalności:</i> spacer kosmiczny i EVA/ medycyna ekstremalna i kosmiczna/ psychologia i socjologia/ IT i telemetria/ architektura i inżynieria kosmiczna/ systemy podtrzymania życia/		
<i>liczba publikacji:</i>	<i>jakość publikacji:</i>	<i>poziom wierności:</i>
wysoka	wysoka	HF

Forma:

<i>typ logistyczny:</i>	<i>formy geometryczne:</i>	<i>układ:</i>
modularny	cylinder	horyzontalny
<i>forma przestrzenna:</i>	<i>infrastruktura:</i>	<i>teren:</i>
bryły obrotowe	centrum medycyny kosmicznej	mała hala EVA - 30m

Tabela 5.11: Dane dotyczące IBMP

nazwa: IBMP

typ: Habitat

ilość misji	A[m ²]	V[m ³]	załoga	m ² /os	m ³ /os
6	216.84	490.06	6	36.14	81.68

	L[m]	W[m]	H[m]	A[m ²]	V[m ³]
Habitat				216.84	490.06
Moduł-EU-50	3.3	6.17	2.26	20.36	46.02
<i>Toaleta</i>			2.26		
<i>Prycze</i>			2.26		
<i>śluz</i>			2.26		
Moduł-EU-100	3.2	11.9	2.26	38.08	86.06
Moduł-EU-150	3.6	20	2.26	72	162.72
<i>Przestrzeń wspólna</i>			2.26		
<i>Kuchnia</i>			2.26		
<i>Łazienka</i>			2.26		
<i>Pokoje</i>			2.26		
<i>Pom. kontrolne</i>			2.26		
<i>toaleta</i>			2.26		
Moduł-EU-250	3.6	24	2.26	86.4	195.26
<i>Siłownia z łazienką</i>			2.26		
<i>Chłodnia</i>			2.26		
<i>Szklarnia</i>			2.26		
<i>Magazyn</i>			2.26		
Moduł Marsjański	6.3	6.3	6	39.69	238.14

Typ funkcji	A[m ²]	A/os.[m ²]
komunikacja	21.68	3.61
życie	143.01	35.75
praca	34.27	8.57
podsystemy	17.88	4.47
suma	216.84	54.21

Tabela 5.12: Dane dotyczące IBMP, część dalsza tabeli



Rysunek 5.18: Graficzna prezentacja powierzchni przypadającej na określoną funkcję w IBMP

5.7 HERA

Human Research Exploration Research Analog (HERA) tłumaczone jako „Analog do badań załogowej eksploracji”. Habitat zaczął powstawać w 2010 roku w zespole prowadzonym przez architekta Scott’a Howe’a z NASA Jet Propulsion Laboratory [128–131]. HERA powstała jako habitat HDU (Habitat Demonstration Unit) na potrzeby programu D-Rats. Placówka jest technologicznym prototypem habitatu integrującym systemy w celu optymalizacji przestrzeni i funkcji. Moduł główny zmieściłby się na większych raketach nośnych.

Prowadzone działania analogowe skupiały się na symulacji misji planetarnych oraz orbitalnych. HERA znajduje się obecnie w Johnson Space Center wewnątrz kompleksu laboratoryjnego. Habitat jest odizolowany od warunków zewnętrznych. W 2011 habitat nosił nazwę HDU i był przetransportowany do Black Point Lava Flow w stanie Arizona na potrzeby analogowej kampanii Desert Rats 2011. Kapsuła złożona jest z ośmiu elementów po wykroju 45 stopni. Konstrukcja każdego elementu wykonana jest z natryskiwanej formy kompozytu żywicy oraz włókna szklanego. Wewnątrz okalającej kompozytowej struktury wprowadzono izolację termiczną z pianki poliuretanowej. Końce każdego elementu wieńczy stalowa C-kształtna rama pozwalająca połączyć ze sobą poszczególne części cylindra oraz pomagająca usztywnić strukturę. Instalacje elektryczne, hydrauliczne i pneumatyczne habitatu prowadzone są w dodatkowej wewnętrznej warstwie ściany. Konstrukcja pozostałych modułów również używa kompozytu żywicy oraz włókna szklanego wypełnionego pianką. Moduły posiadają wewnętrzny usztywniający aluminiowy stelaż, Wyższe kondygnacje mają formę wielowarstwowego pneumatycznego namiotu na aluminiowym stelażu. HERA w obecnej formie składa się z trzech modułów w formie cylindrów - dwóch w orientacji horyzontalnej oraz głównego modułu w orientacji wertykalnej. Centralny, wertykalny moduł o średnicy 5,9 m i wysokości 8 m posiada 3 poziomy. Poziom pierwszy jest kompozytowym cylindrem z tworzyw sztucznych, który skomunikowany jest z wyższymi kondygnacjami centralnym podnośnikiem hydraulicznym. Wyższe kondygnacje mają formę wielowarstwowego pneumatycznego namiotu na aluminiowym stelażu. Forma i struktura tej nadbudowy została wyłoniona w ramach akademickiego konkursu inżynierskiego X-Hab Academic Innovation Challenge [131]. Celem konkursu było pokazanie potencjału połączenia struktur o konstrukcji sztywnej z konstrukcjami nadmuchiwanymi oraz rozkładanymi, podyktowany chęcią zmniejszenia wagi oraz objętości ładunku wysłanego w kosmos. Rywalizację zwyciężył zespół z Uniwersytetu Wisconsin [131]



Rysunek 5.19: Habitat HERA-HDU, źródło: [129]

nazwa: HERA

<i>rok powstania</i>	<i>inwestor</i>	<i>projektant</i>
2010	NASA	Scott Howe
<i>lokalizacja:</i>	<i>środowisko:</i>	<i>funkcja środowiska:</i>
Black Point Lava Flow, Arizona 2011	ekstremalne: izolacja	testy terenowe

Cechy technologiczne:

<i>typ architektury:</i>	<i>system konstrukcyjny:</i>	<i>wyzwania środowiskowe:</i>
Orbitalna, Planetarna , Mobilna/Pojazd, Śluza, Skafander Kosmiczny		Zagrożenia środowiskowe, wyzwania behawioralne, spacery kosmiczne , Inżynieria systemów
<i>typ konstrukcji:</i>	<i>HRL:</i>	<i>TRL dla symulatorów:</i>
spin-off	6	6
<i>jakość wykonania:</i>	<i>użyte materiały:</i>	<i>poziom wierności:</i>
Wysoka	Włókno szklane, tkaniny	HF

Cechy operacyjne:

<i>liczność załogi:</i>	<i>liczba misji:</i>	<i>dni misji: średnio/maks.</i>
0	15	25/ 90
<i>status aktywności:</i>	<i>intensywność aktywności:</i>	<i>poziom wierności:</i>
placówka w użyciu	liczne testy, sporadyczne misje	HF
<i>działania analogowe:</i>		<i>działania poza analogowe:</i>
analogowe symulacje misji/ testy analogowe / testy technologii/ zarządzanie misją / prowadzenie badań / zbieranie danych w trybie ciągłym		

Cechy naukowe:

<i>dyscyplina i obszar działalności:</i> nauki planetarne/ ISRU/ robotyka/ spacery kosmiczne i EVA/ medycyna ekstremalna i kosmiczna/ psychologia i socjologia/ IT i telemetria/ architektura i inżynieria kosmiczna/ testy wyposażenia/		
<i>liczba publikacji:</i>	<i>jakość publikacji:</i>	<i>poziom wierności:</i>
wysoka	wysoka	HF

Forma:

<i>typ logistyczny:</i>	<i>formy geometryczne:</i>	<i>układ:</i>
modularny, monolityczny, mieszany	kopuła, cylinder	wertykalny, horyzontalny, liniowy
<i>forma przestrzenna:</i>	<i>infrastruktura:</i>	<i>teren:</i>
bryły obrotowe	centrum badawcze / treningowe	obecnie: wewnątrz hali

Determinanty w kształtowaniu formy analogowych habitatów kosmicznych

nazwa: HERA

typ: Habitat

ilość misji	A[m ²]	V[m ³]	załoga	m ² /os	m ³ /os
8	62.87	289.99	4	15.72	72.5

	L[m]	W[m]	H[m]	A[m ²]	V[m ³]
Habitat			0	62.87	289.99
Cylinder Centralny	5	5	7	48.85	137.38
Poziom 1	5	5	2.5	19.62	48.96
<i>Stacja medyczna</i>			2.5	4.7	11.75
<i>Warsztat</i>			2.5	4.7	11.75
<i>Stacja telerobotyczna</i>			2.5	4.7	11.75
<i>Symulator lotu</i>			2.5	4.7	11.75
<i>winda/podnośnik</i>	1	1	2.5	.78	1.96
Poziom 2	5	5	2.5	19.62	48.96
<i>Kuchnia</i>			2.5	4.7	11.75
<i>Blat roboczy</i>			2.5	4.7	11.75
<i>Siłownia</i>			2.5	4.7	11.75
<i>Stacja komunikacyjna</i>			2.5	4.7	11.75
<i>winda/podnośnik</i>	1	1	2.5	.78	1.96
Poziom 3	5	5	2	0	0
<i>Pokoje</i>	2	1.2	2	9.6	19.2
Moduł służby	2.6	2.6	2.5	3.62	70.98
Moduł higieniczny	4	2.6	2.5	10.4	81.64

Typ funkcji	A[m ²]	A/os.[m ²]
komunikacja	5.57	1.39
życie	21.7	5.43
praca	21.5	5.38
podsystemy	14.02	3.5
suma	62.79	15.7

Tabela 5.14: Dane dotyczące habitatu Hera - ciąg dalszy



Rysunek 5.20: Ilustracja graficzna powierzchni przypadającej na określoną funkcję w habitatcie HERA

5.8 HALLEY VI

Stacja Badawcza Halley VI należy do British Antarctic Survey (BAS), brytyjskiej rządowej organizacji zajmującej się badaniem Antarktyki [132, 133]. Projekt stacji został wyłoniony w roku 2005 podczas konkursu architektonicznego RIBA, który wygrali brytyjscy architekci Fauber Maunsell oraz Hugh Broughton. Budowa modułowego projektu stacji odbywała się w Kapsztadzie w RPA. Na stacji prowadzi się badania m.in. z zakresu badań atmosfery, badań profili lodowców. Dzięki badaniom prowadzonym na stacji Halley została odkryta dziura ozonowa w atmosferze Ziemi. Stacja niejednokrotnie była używana przez NASA jako habitat analogowy. Stacja może w komfortowych warunkach przyjąć 32 członków załogi⁴.

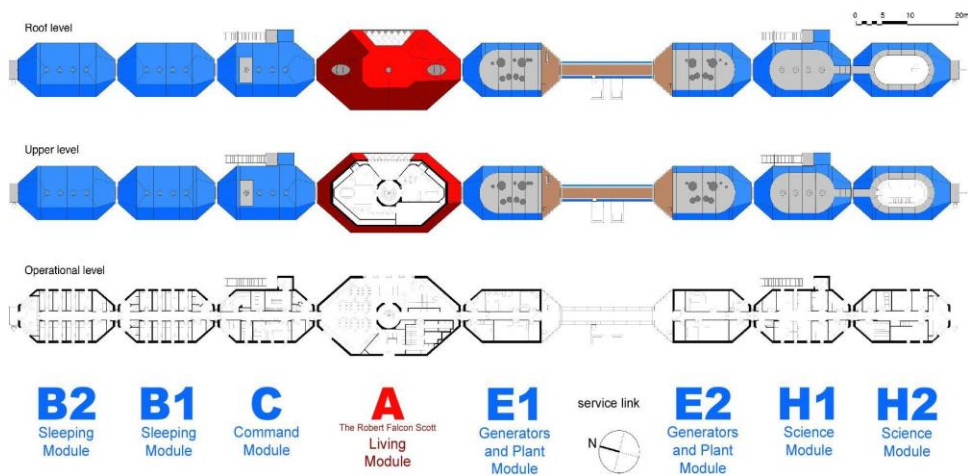
Stacja Halley VI to złożona z ośmiu modułów liniowa struktura. Moduły to wieloboki o horyzontalnej orientacji osadzone na stopach izolacyjnych. Moduły stacji podzielone są na dwie strefy rozdzielone mostem serwisowym. Większą strefą, zajmującą pięć modułów, jest strefa życiowa. Znajdują się tam dwa moduły mieszkalne, każdy z 8 kajutami, moduł dowodzenia oraz moduł życiowy mieszczący kuchnię, jadalnię, czytelnię, ściankę wspinaczkową oraz kawiarenkę internetową. Nad modułem życiowym jest moduł serwisowy z generatorami. Moduł ten łączy się pomostem serwisowym z bliźniaczym modułem w strefie naukowej. Strefa naukowa zajmuje 3 moduły: drugi moduł serwisowy i dwa moduły laboratoryjne. Podział stacji na dwie strefy oddzielone otwartym pomostem jest zabiegiem formalnym w celu oddzielenia przestrzeni do pracy od przestrzeni do odpoczynku i życia prywatnego. Największy moduł stacji, moduł życiowy, zapewnia wygodę i rozrywkę dla załogi. Wyróżnia się też kolorem spośród innych modułów stacji. Projektanci wiele uwagi poświęcili komfortowi użytkowników. Jest to istotny element dotyczący projektów pomieszczeń przeznaczonych dla ludzi przebywających w ekstremalnych warunkach habitatu.

⁴<https://www.bas.ac.uk/polar-operations/sites-and-facilities/facility/halley/about>, dostęp grudzień 2022



Rysunek 5.21: Habitat Halley VI, źródło: [134]

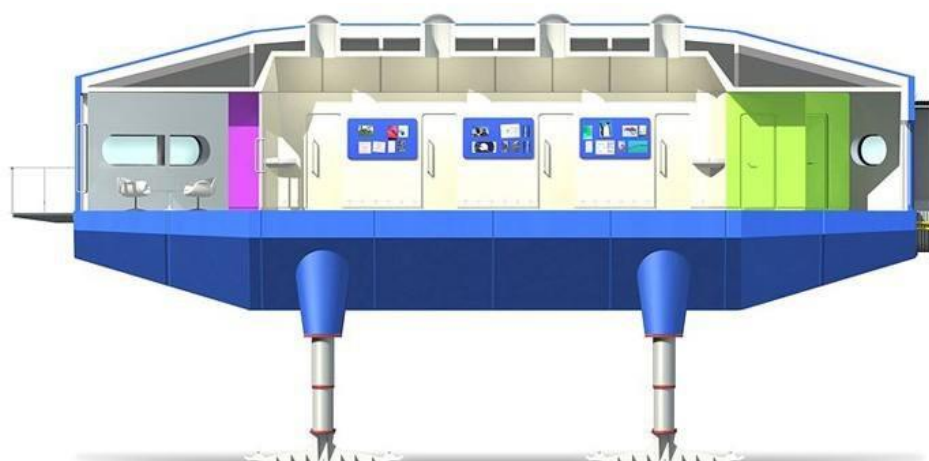
Halley VI Research Station - Layout



Rysunek 5.22: Habitat Halley VI, źródło: [134]



Rysunek 5.23: Habitat Halley VI, źródło: [134]



Rysunek 5.24: Habitat Halley VI, źródło: [134]

Determinanty w kształtowaniu formy analogowych habitatów kosmicznych

nazwa: Halley-VI

<i>rok powstania</i>	<i>inwestor</i>	<i>projektant</i>
2012	British Antarctic Survey (BAS)	AECOM
<i>lokalizacja:</i>	<i>środowisko:</i>	<i>funkcja środowiska:</i>
Pływ Brunt, Antarktyda	ekstremalne: arktyczne	prawdziwe środowisko ekstremalne

Cechy technologiczne:

<i>typ architektury:</i>	<i>system konstrukcyjny:</i>	<i>wyzwania środowiskowe:</i>
Planetarna/Mobilna/Pojazd		Zagrożenia środowiskowe, wyzwania behawioralne
<i>typ konstrukcji:</i>	<i>HRL:</i>	<i>TRL dla symulatorów:</i>
spin-in	-	5
<i>jakość wykonania:</i>	<i>użyte materiały:</i>	<i>poziom wierności:</i>
Wysoka		HF

Cechy operacyjne:

<i>liczność załogi:</i>	<i>liczba misji:</i>	<i>dni misji: średnio/maks.</i>
0	11	365/ 365
<i>status aktywności:</i>	<i>intensywność aktywności:</i>	<i>poziom wierności:</i>
placówka w użyciu od 2013	sporadyczne testy	LF
<i>działania analogowe:</i>	<i>działania poza analogowe:</i>	
testy analogowe/prowadzenie badań	edukacja i popularyzacja nauki/trening ludzki	

Cechy naukowe:

<i>dyscyplina i obszar działalności:</i> nauki planetarne/ medycyna ekstremalna i kosmiczna/ psychologia i socjologia/		
<i>liczba publikacji:</i>	<i>jakość publikacji:</i>	<i>poziom wierności:</i>
umiarkowana	umiarkowana	HF

Forma:

<i>typ logistyczny:</i>	<i>formy geometryczne:</i>	<i>układ:</i>
mieszany	kapsuła, prostopadłościan	liniowy
<i>forma przestrzenna:</i>	<i>infrastruktura:</i>	<i>teren:</i>
wielościany	zabudowania techniczne	lodowa pustynia

Tabela 5.15: Dane dotyczące Halley-VI

nazwa: **Halley VI**

typ: Habitat

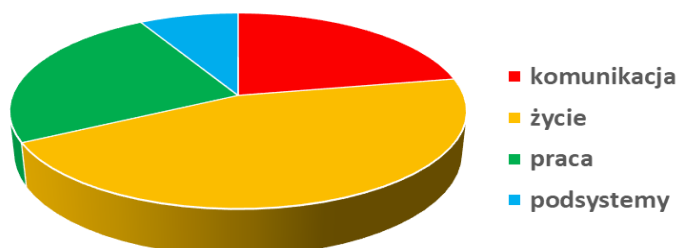
ilość misji	A[m ²]	V[m ³]	załoga	m ² /os	m ³ /os
10	1521.2	4303	50	30.42	86.06

	L[m]	W[m]	H[m]	A[m ²]	V[m ³]
Habitat			2.5	1521.2	4303
Moduł Mieszkalny			2.5	170.2	425.5
<i>Życie</i>			2.5	124	310
<i>Komunikacja</i>			2.5	46.2	115.5
Moduł Mieszkalny			2.5	170.2	425.5
<i>Życie</i>			2.5	124	310
<i>Komunikacja</i>			2.5	46.2	115.5
Moduł Dowodzenia			2.5	170.2	425.5
<i>praca</i>			2.5	124	310
<i>Komunikacja</i>			2.5	46.2	115.5
Moduł Społeczny			3.5	500	1750
<i>Życie</i>			2.5	440	1100
<i>Komunikacja</i>			2.5	60	150
Moduł Generatorów			2.5	170.2	425.5
<i>podsystemy</i>			2.5	124	310
<i>Komunikacja</i>			2.5	46.2	115.5
Moduł Naukowy			2.5	170.2	425.5
<i>praca</i>			2.5	124	310
<i>Komunikacja</i>			2.5	46.2	115.5
Moduł Naukowy			2.5	170.2	425.5
<i>praca</i>			2.5	124	310
<i>Komunikacja</i>			2.5	46.2	115.5

Typ funkcji	A[m ²]	A/os.[m ²]
komunikacja	337.2	6.74
życie	688	13.76
praca	372	7.44
podsystemy	124	2.48
suma	1521.2	30.42

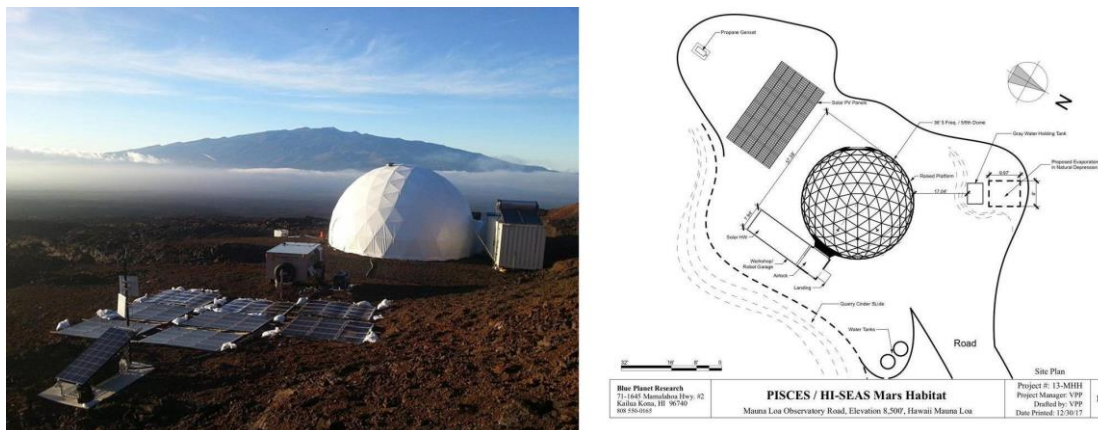
Tabela 5.16: Dane dotyczące habitatu Halley VI – ciąg dalszy

Powierzchnia przypadająca na określoną funkcję



Rysunek 5.25: Ilustracja graficzna powierzchni przypadającej na określoną funkcję w habitacie Halley VI

5.9 HI-SEAS

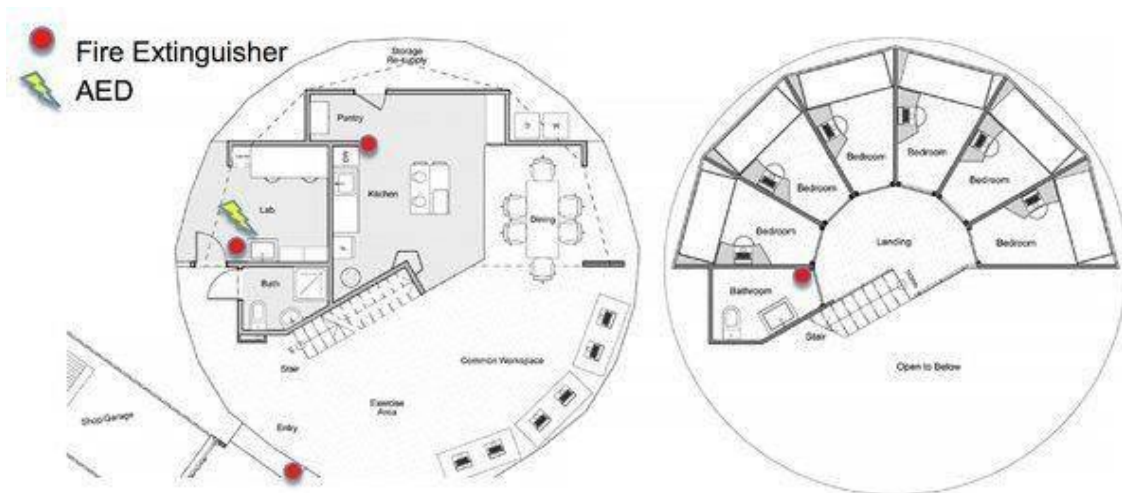


Rysunek 5.26: Habitat HI-SEAS, źródło: [138]

HI-SEAS – *Hawai'i Space Exploration Analog and Simulation* [135–137], czyli Hawajski Analog Eksploracji Kosmicznej i Symulacji. Habitat powstał w 2013 roku głównie przy udziale University of Hawaii oraz był współfinansowany przez NASA [136]. W habitacie prowadzono badania nad długoterminową izolacją i jest uznawany za jeden z lepszych habitatów analogowych. Najdłuższa misja trwała 360 dni. Po sześciu misjach analogowych sfinansowanych przez NASA habitat przeszedł w ręce prywatne. Od 2018 roku prowadzona jest komercyjna działalność naukowa związana z działaniami analogowymi. HI-SEAS zlokalizowany jest na zboczu góry Mauna Loa na wysokości 2500 m n.p.m. na wyspie Hawaj. Mauna Loa jest mierzącym 4169 m wulkanem tarczowym. Mauna Loa jest interesująca z powodu licznych tuneli lawowych, które powstały w wyniku szybkiego zastygnięcia wierzchniej warstwy płynnej magmy. Podobne formacje zostały potwierdzone na zdjęciach satelitarnych na Marsie i Księżycu. Główna struktura habitatu to aluminiowa kopuła geodezyjna obłożona tkaniną PVC oraz wewnętrznymi materiałowymi warstwami izolacji. Wewnętrzne drewniane przegrody oraz antresola wykonane są w technologii szkieletowej. Do habitatu dołączony jest moduł serwisowy w postaci kontenera morskiego, w którym znajdują się instalacje elektryczne oraz magazyn EVA. Stacja zasilenie otrzymuje z farmy paneli fotowoltaicznych o mocy 12 kW. HI-SEAS składa się z dwóch podstawowych elementów: 12-metrowego kontenera morskiego oraz geodezyjnej kopuły o średnicy 11 metrów i wysokości 5,5 m. W kontenerze morskim znajduje się pomieszczenie techniczne, warsztat mechaniczny oraz śluza prowadząca do środka kopuły. Wewnątrz kopuły są dwie kondygnacje. Na pierwszej kondygnacji znajduje się małe laboratorium, kuchnia, łazienka oraz magazyn. Drugą kondygnację przeznaczono na przestrzeń wspólną ze stanowiskami do pracy oraz treningu. Na tej kondygnacji znajduje się też antresola otwierająca się na przestrzeń wspólną znajdującą się poniżej. Na antresoli znajdują się wejścia do 6 małych prywatnych pomieszczeń oraz do toalety.



Rysunek 5.27: Habitat HI-SEAS, źródło: [138]



Rysunek 5.28: Habitat HI-SEAS. Funkcje pomieszczeń, źródło: [138]

Determinanty w kształtowaniu formy analogowych habitatów kosmicznych

nazwa: Hi-SEAS

<i>rok powstania</i>	<i>inwestor</i>	<i>projektant</i>
2013		-
<i>lokalizacja:</i>	<i>środowisko:</i>	<i>funkcja środowiska:</i>
Manua Loa, Hawaje, USA	ekstremalne: góry	testy terenowe

Cechy technologiczne:

<i>typ architektury:</i>	<i>system konstrukcyjny:</i>	<i>wyzwania środowiskowe:</i>
Planetarna , Skafander Kosmiczny		Zagrożenia środowiskowe, wyzwania behawioralne, spacerzy kosmiczne
<i>typ konstrukcji:</i>	<i>HRL:</i>	<i>TRL dla symulatorów:</i>
spin-in	-	5
<i>jakość wykonania:</i>	<i>użyte materiały:</i>	<i>poziom wierności:</i>
umiarkowana	Stal, pokrycie PCV	MF

Cechy operacyjne:

<i>liczność załogi:</i>	<i>liczba misji:</i>	<i>dni misji: średnio/maks.</i>
0	30	14/ 365
<i>status aktywności:</i>	<i>intensywność aktywności:</i>	<i>poziom wierności:</i>
placówka w użyciu	regularne misje analogowe	MF
<i>działania analogowe:</i>	<i>działania poza analogowe:</i>	
analogowe symulacje misji/testy analogowe / testy technologii / prowadzenie badań	działalność komercyjna	

Cechy naukowe:

<i>dyscyplina i obszar działalności:</i> nauki planetarne/ ISRU/ spacerzy kosmiczne i EVA/ medycyna ekstremalna i kosmiczna/ psychologia i socjologia/ produkcja żywności/ testy wyposażenia/		
<i>liczba publikacji:</i>	<i>jakość publikacji:</i>	<i>poziom wierności:</i>
wysoka	wysoka	HF

Forma:

<i>typ logistyczny:</i>	<i>formy geometryczne:</i>	<i>układ:</i>
monolityczny	kopuła	centralny
<i>forma przestrzenna:</i>	<i>infrastruktura:</i>	<i>teren:</i>
bryły obrotowe	panele słoneczne, kontener techniczny	zbocze wulkanu

Tabela 5.17: Dane dotyczące Hi-SEAS

nazwa: HI-SEAS

typ: Habitat

ilość misji	A[m ²]	V[m ³]	załoga	m ² /os	m ³ /os		
20	179.02	593.55	6	29.84	98.93		
			L[m]	W[m]	H[m]	A[m ²]	V[m ³]
Habitat						179.02	593.55
Kontener morski			12.19	2.44	2.89	29.72	85.9
<i>pom. tech.</i>							
<i>warsztat</i>							
<i>śluza</i>							
Kopuła			11.5	11.5	5.7	149.3	507.65
Poziom 1			11	11	2.5	91	332.75
<i>Laboratorium</i>					2.5	9.9	24.75
<i>Kuchnia</i>					2.5	25.8	64.5
<i>Łazienka</i>					2.5	2.9	7.25
<i>Magazyn</i>					2.5	10.3	25.75
<i>Przestrzeń wspólna</i>					5	42.1	210.5
Poziom 2					3	58.3	174.9
<i>Antresola</i>					3	7.7	23.1
<i>Toaleta</i>					3	4.1	12.3
<i>Pokoje</i>					3	46.5	139.5

Typ funkcji	A[m ²]	A/os.[m ²]
komunikacja	21.59	3.6
życie	93.61	23.4
praca	34.09	8.52
podsystemy	29.72	7.43
suma	179.02	44.76

Tabela 5.18: Dane dotyczące HI-SEAS – część dalsza tabeli



Rysunek 5.29: Graficzna prezentacja przestrzeni przypadającej na poszczególne funkcje habitatu HI-SEAS

5.10 Lunar Palace 1

Lunar Palace 1, chińska placówka do testowania rozwiązań na potrzeby przyszłej bazy księżycowej [139-144]. Zaprojektowana przez inżyniera Liu Honga z Pekńskiego Uniwersytetu Aeronautycznego i Astronautycznego w roku 2013. Nazwa Lunar Palace pochodzi od akronimu: LUNAR Permanent Astrobase Life-support Artificial Closed Ecosystem. Placówkę, podobnie jak BIOS-3 oraz Biosphere-2, można zaliczyć do prototypowych bioregeneracyjnych systemów podtrzymywania życia, czyli tzw. BLSS (Bioregenerative life support system). Pierwsza symulacja odbyła się w 2014 roku. Załoga składająca się z 3 osób – mężczyzny oraz dwóch kobiet – spędziła w habitacie 105 dni. Prowadzone badania miały szeroki zakres. Skupiały się na ludziach w izolacji, wpływu podwyższonego poziomu CO₂ na zachowanie załogi, próby naturalnej regulacji poziomów CO₂ przy pomocy roślin, oraz ogólnych badań nad sprawnością bioregeneracyjnego systemu podtrzymywania życia. Załoga wytworzyła na pokładzie, zgodnie z planem, 55 procent potrzebnej na potrzeby misji żywności. Misja wyróżniła się dokładną telemetrią zdrowia załogi oraz próbami regulacji ich środowiska wraz z rozwojem misji. Podwyższone poziomy CO₂ miały negatywny wpływ na zachowanie w załogi i mogły zagrozić zdrowiu załogi oraz przebiegowi misji (podobnie jak w misji Biosphere-2). Udało się jednak obniżyć poziom CO₂ i dokończyć misję. Misję Lunar Palace 1 można zaliczyć do jednych z lepiej przeprowadzonych symulacji misji księżycowej.

Placówka znajduje się wewnątrz hal badawczych Pekńskiego Uniwersytetu Aeronautycznego i Astronautycznego i jest całkowicie odizolowana od środowiska naturalnego. Na strukturę Lunar Palace 1 składają się trzy moduły o formie horyzontalnych walców ściętych przy podłodze. Dwa moduły o powierzchni 60 m² oraz objętości 210 m³ przeznaczone są pod hydroponiczne uprawy wertykalne. Do modułów uprawnych podłączony został moduł mieszkalny zaprojektowany dla 3 osób. Moduł ma powierzchnię 42 m² i objętość 105 m³. Mieszczą się w nim sypialnie, jadalnia, łazienka oraz komora usuwania opadów.



Rysunek 5.30: Habitat Lunar Palace 1, źródło: [145]



Rysunek 5.31: Habitat Lunar Palace 1, źródło: [145]

Determinanty w kształtowaniu formy analogowych habitatów kosmicznych

nazwa: Lunar Palace

<i>rok powstania</i>	<i>inwestor</i>	<i>projektant</i>
2014	Beihang University	-
<i>lokalizacja:</i>	<i>środowisko:</i>	<i>funkcja środowiska:</i>
Beihang University, Chiny	ekstremalne: izolacja	izolacja

Cechy technologiczne:

<i>typ architektury:</i>	<i>system konstrukcyjny:</i>	<i>wyzwania środowiskowe:</i>
Planetarna		Systemy podtrzymywania życia, wyzwania behawioralne, Inżynieria systemów
<i>typ konstrukcji:</i>	<i>HRL:</i>	<i>TRL dla symulatorów:</i>
spin-off	5	6
<i>jakość wykonania:</i>	<i>użyte materiały:</i>	<i>poziom wierności:</i>
Wysoka		HF

Cechy operacyjne:

<i>liczność załogi:</i>	<i>liczba misji:</i>	<i>dni misji: średnio/maks.</i>
0	4	45/ 370
<i>status aktywności:</i>	<i>intensywność aktywności:</i>	<i>poziom wierności:</i>
placówka w użyciu	sporadyczne misje analogowe	HF
<i>działania analogowe:</i>		<i>działania poza analogowe:</i>
analogowe symulacje misji / testy analogowe / testy technologii / zarządzanie misją / prowadzenie badań / zbieranie danych w trybie ciągłym		

Cechy naukowe:

<i>dyscyplina i obszar działalności:</i> nauki planetarne/ medycyna ekstremalna i kosmiczna/ psychologia i socjologia/ IT i telemetria/ systemy podtrzymania życia/ produkcja żywności/ biotechnologia/		
<i>liczba publikacji:</i>	<i>jakość publikacji:</i>	<i>poziom wierności:</i>
wysoka	umiarkowana	HF

Forma:

<i>typ logistyczny:</i>	<i>formy geometryczne:</i>	<i>układ:</i>
modularny	cylinder	horyzontalny
<i>forma przestrzenna:</i>	<i>infrastruktura:</i>	<i>teren:</i>
bryły obrotowe	instytut badawczy	brak

Tabela 5.19: Dane dotyczące Lunar Palace 1

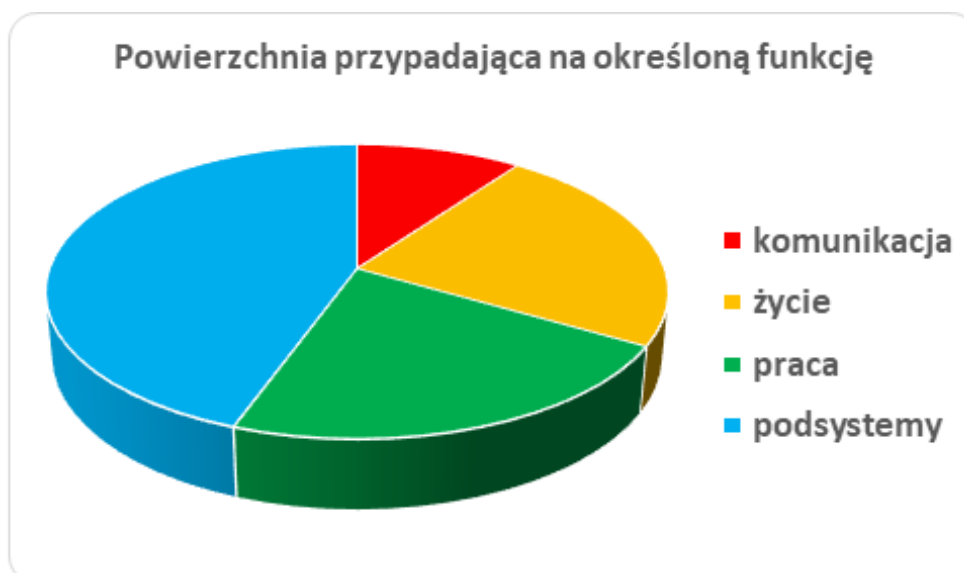
nazwa: Lunar Palace 1

typ: Habitat

ilość misji	A[m ²]	V[m ³]	załoga	m ² /os	m ³ /os		
4	162	525	2	81	262.5		
			L[m]	W[m]	H[m]	A[m ²]	V[m ³]
Habitat						162	525
Moduł Mieszkalny			14	3	2.5	42	105
3 sypialnie					2.5		
Jadalnia					2.5		
Łazienka					2.5		
Komora usuwania odpadów					2.5		
Moduł Szklarni			10	6	3.5	60	210
Moduł Szklarni			10	6	3.5	60	210

Typ funkcji	A[m ²]	A/os.[m ²]
komunikacja	16.2	8.1
życie	37.8	9.45
praca	36	9
podsystemy	72	18
suma	162	40.5

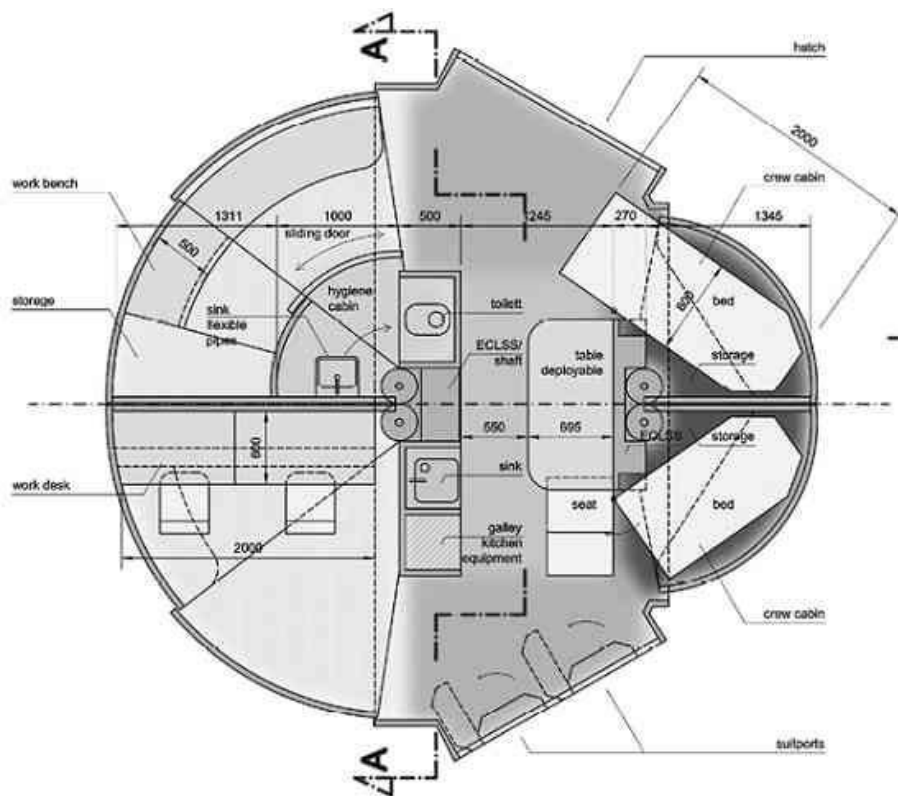
Tabela 5.20: Lunar Palace 1



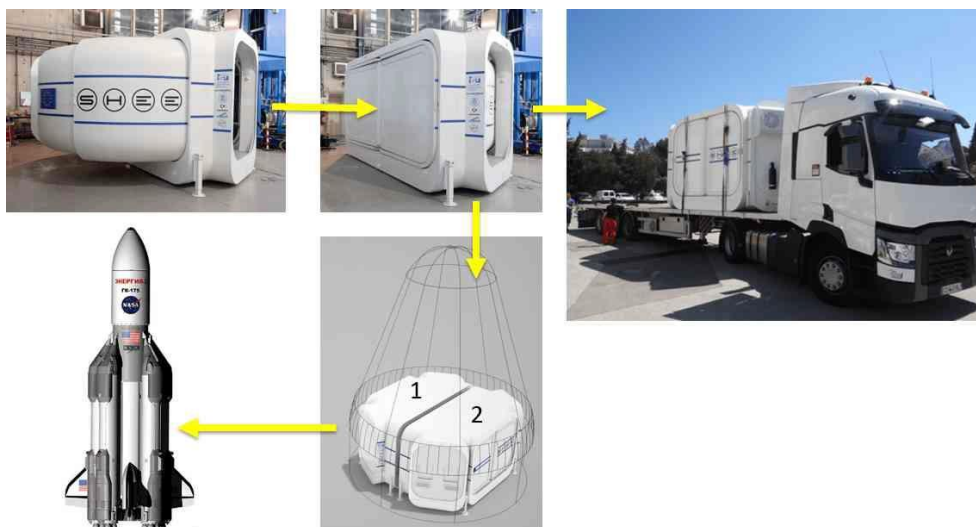
Rysunek 5.32: prezentacja graficzna powierzchni przypadającej na określoną funkcję w Lunar Palace 1

5.11 SHEE

Self-Deployable Habitats for Extreme Environments (SHEE) tłumaczyć można jako „Samo-rozkładany Habitat dla Ekstremalnych Środowisk”. Projekt został zapoczątkowany w roku 2013 w ramach projektu EU Horyzont 2020 przez międzynarodowe konsorcjum, w którego skład wchodziły firmy Liquifer Systems Group, Comex Space, Soberity and Spin, Uniwersytet w Kazaniu i International Space University [146–148]. Zaprojektowany został przez znaną architekt kosmiczną Barbarę Imhof. Habitat jest prototypem mobilnego rozkładanego laboratorium. SHEE będąc jednostką mobilną i może być przewieziony w dowolne miejsce prowadzenia eksperymentów. Pierwsze testy polowe odbywały się w 2016 roku w kamieniołomach z okolicach rzeki Rio Tinto w Hiszpanii. Obecnie habitat przebywa na terenie kampusu International Space University w Stuttgarcie i służy głównie celom dydaktycznym. Są plany transportu habitatu SHEE do Polski w sąsiedztwo placówki badawczej LunAres. SHEE wykonany został metodami stosowanymi w konstrukcji jachtów. Poszycie uformowano z żywicy oraz włókien szklanych i wypełnione pianką izolacyjną. Główna część konstrukcji posiada warstwę izolacyjną grubości 60 mm, natomiast konstrukcja wachlarzowych płatków posiada izolację grubości 30 mm. Wyposażony jest w prosty system podtrzymywania życia, na który składają się akumulatory, wewnętrzne zbiorniki z wodą, klimatyzacja oraz inteligentna regulacja światła i temperatury. Habitat posiada wewnętrzne oraz zewnętrzne czujniki monitorujące poziom CO₂, O₂, temperaturę, wilgotność oraz natężenie światła. W postaci złożonej i gotowej do transportu ma wymiary zbliżone do kontenera morskiego o wymiarach 6 m na 2,4 m. Po rozłożeniu ośmiu wachlarzowych elementów, zwanych przez twórców „płatkami”, habitat przybiera formę wertykalnego cylindra o średnicy 5,5 m i wysokości 2,8 m. Habitat ma symulować mobilne laboratorium dla dwóch osób, bądź małą placówkę badawczą. Wewnątrz znajduje się sześć odmiennych funkcjonalnie przestrzeni. Przestrzeń życiowa jest częściowo wydzielona i składa się z przestrzeni z łózkami członków załogi, małej przestrzeni wspólnej i aneksu kuchennego. Przestrzeń służ pozwala zadokować kolejny moduł, albo zamontować tzw. suitporty – interfejsy pozwalające na zewnętrznie mocowanie skafandrów kosmicznych. Kolejną przestrzenią jest warsztat połączony z małym magazynem. W ich sąsiedztwie znajduje się mały moduł higieniczny. Ostatnią przestrzenią są stanowiska do pracy, które mogą również służyć za małe laboratorium. W centrum habitatu znajduje się przestrzeń mieszcząca system podtrzymywania życia. Wnętrze habitatu ma powierzchnię 23,5 m² i objętość 50,8 m³.



Rysunek 5.33: Habitat SHEE, źródło: [149]



Rysunek 5.34: Habitat SHEE, źródło: [149]

Determinanty w kształtowaniu formy analogowych habitatów kosmicznych

nazwa: SHEE

<i>rok powstania</i>	<i>inwestor</i>	<i>projektant</i>
2015	Komisja Europejska	Barbara Imhof
<i>lokalizacja:</i>	<i>środowisko:</i>	<i>funkcja środowiska:</i>
Stuttgart, Niemcy	placówka mobilna	

Cechy technologiczne:

<i>typ architektury:</i>	<i>system konstrukcyjny:</i>	<i>wyzwania środowiskowe:</i>
Planetarna, Mobilna / Pojazd		Systemy podtrzymywania życia, zagrożenia środowiskowe, wyzwania behawioralne, spacery kosmiczne, Inżynieria systemów
<i>typ konstrukcji:</i>	<i>HRL:</i>	<i>TRL dla symulatorów:</i>
spin-off	5	5
<i>jakość wykonania:</i>	<i>użyte materiały:</i>	<i>poziom wierności:</i>
wysoka		HF

Cechy operacyjne:

<i>liczność załogi:</i>	<i>liczba misji:</i>	<i>dni misji: średnio/maks.</i>
2	2	5/ 7
<i>status aktywności:</i>	<i>intensywność aktywności:</i>	<i>poziom wierności:</i>
Obecnie: cele edukacyjne	projekt zakończony	HF
<i>działania analogowe:</i>	<i>działania poza analogowe:</i>	
Testy analogowe / testy technologii / zarządzanie misją / prowadzenie badań / zbieranie danych w trybie ciągłym	edukacja i popularyzacja nauki	

Cechy naukowe:

<i>dyscyplina i obszar działalności:</i> nauki planetarne/ ISRU/ spacery kosmiczne i EVA/ medycyna ekstremalna i kosmiczna/ psychologia i socjologia/ IT i telemetria/ architektura i inżynieria kosmiczna/ systemy podtrzymania życia/ testy wyposażenia/		
<i>liczba publikacji:</i>	<i>jakość publikacji:</i>	<i>poziom wierności:</i>
umiarkowana	wysoka	HF

Forma:

<i>typ logistyczny:</i>	<i>formy geometryczne:</i>	<i>układ:</i>
modularny	cylinder	wertykalny
<i>forma przestrzenna:</i>	<i>infrastruktura:</i>	<i>teren:</i>
bryły obrotowe	brak	obecnie na wystawie

Tabela 5.21: Dane dotyczące habitatu SHEE

nazwa: SHEE

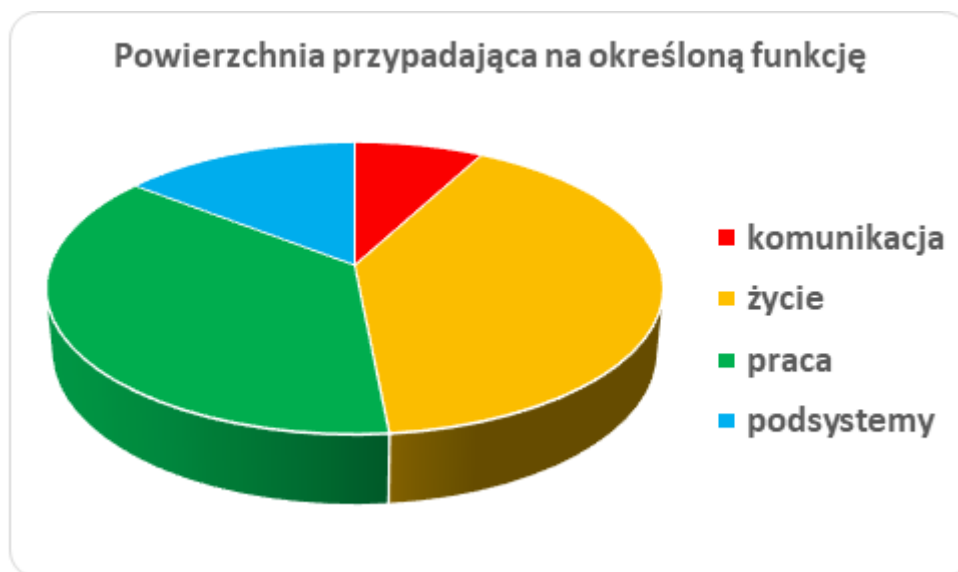
typ: Habitat

ilość misji	A[m ²]	V[m ³]	załoga	m ² /os	m ³ /os
4	23.5	65.8	2	11.75	32.9

	L[m]	W[m]	H[m]	A[m ²]	V[m ³]
Habitat			2.8	23.5	65.8
Habitat interior			2.2	23.1	50.82
<i>kabiny załogi</i>			2.2	4.3	9.46
<i>p. wspólna z aneksem</i>			2.2	9.2	20.24
<i>stanowiska pracy</i>			2.2	4.7	10.34
<i>łazienka</i>			2.2	1.3	2.86
<i>warsztat i składzik</i>			2.2	3.6	7.92

Typ funkcji	A[m ²]	A/os.[m ²]
komunikacja	1.84	.92
życie	9.55	2.39
praca	8.7	2.18
podsystemy	3.41	.85
suma	23.5	5.88

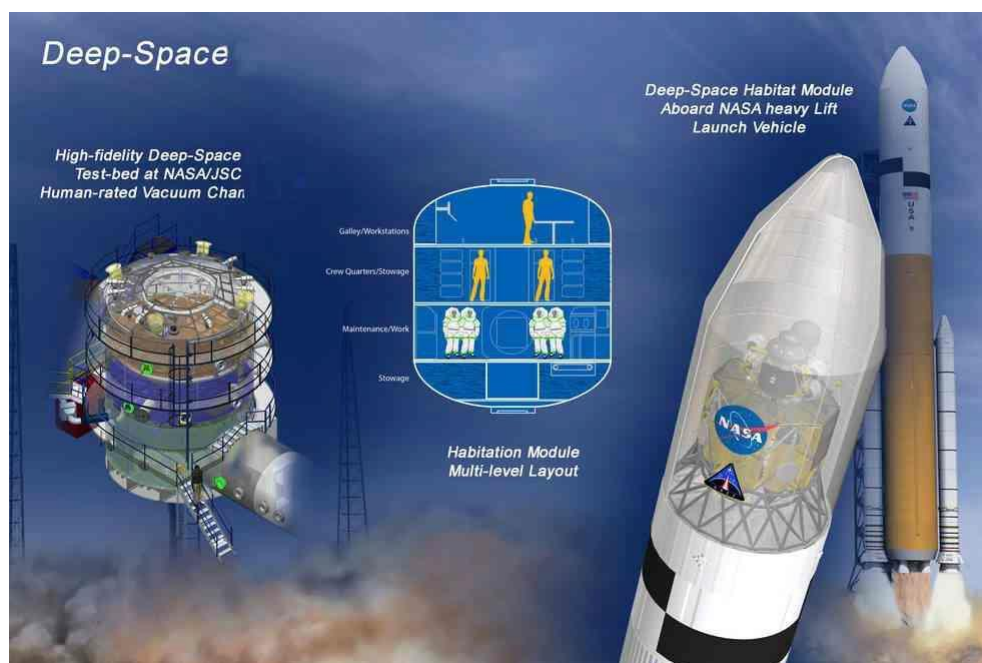
Tabela 5.22: dane dotyczące habitatu SHEE- dalsza część tabeli



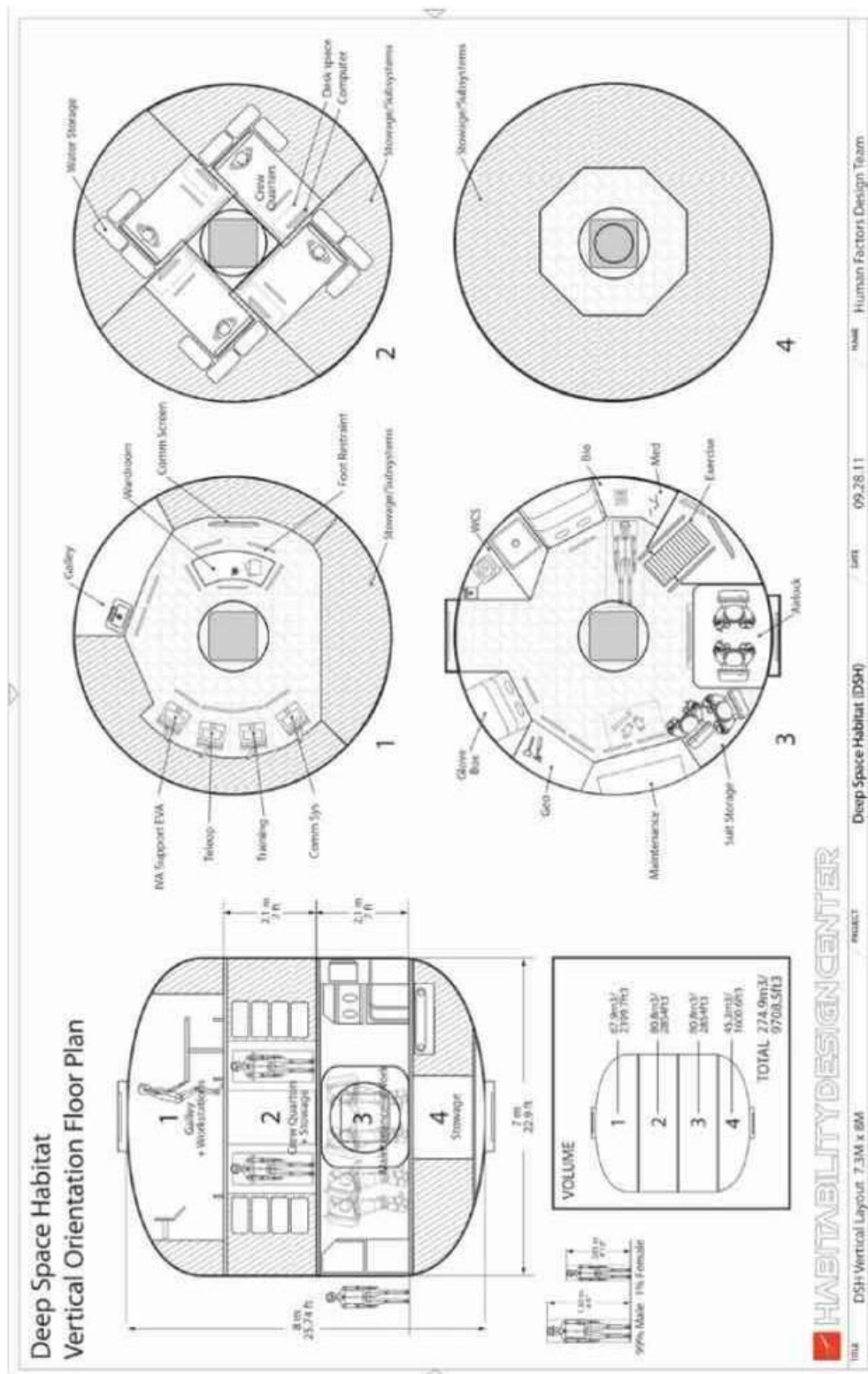
Rysunek 5.35: Ilustracja graficzna powierzchni przypadającej na określone funkcje

5.12 HESTIA

HESTIA [150–152], czyli Human Exploration Testbed for Integration and Advancement można przetłumaczyć jako „Tester do Integracji i Rozwoju Załogowej Eksploracji”. W obecnej formie powstała w 2015 roku, na Florydzie. Od początku amerykańskiego programu załogowego jest to ciągle rozwijana instalacja. Pierwsze, nieczynne już iteracje tego projektu, pomagały rozwijać kapsuły załogowe dla projektów Mercury, Gemini oraz Apollo. HESTIA jest prototypem habitatu załogowego mogącego symulować misję kosmiczną, bądź planetarną. Jego architektura była tworzona z myślą o użytkowaniu w stanie nieważkości, ale doskonale pełni swoją funkcję również w obecności ciężenia. Obecnie, jest to najbardziej kompleksowo zaprojektowany oraz przetestowany prototyp habitatu kosmicznego. HESTIA posiada formę wertykalnej kapsuły o średnicy 7 m oraz wysokości 8 m. Wewnątrz mieszczą się 4 poziomy, jeden o wysokości 1,4 m, pozostałe o wysokości 2,2 m. Najwyższy poziom jest przeznaczony na funkcje związane z codziennym życiem takie jak stanowiska pracy, aneks kuchenny oraz jadalnia. Niżej znajduje się poziom z kabinami dla czteroosobowej załogi oraz przestrzeń magazynowa i dla podsystemów. Na kolejnym poziomie znajduje się przestrzeń operacyjna ze stanowiskami do prac badawczych, stanowisko sportowe, łazienka, dwie śluzy oraz magazyn skafandrów kosmicznych. Wśród stanowisk badawczych znajduje się stanowisko medyczne, biologiczne, geologiczne, warsztatowe oraz komora laminarna. Ostatni najmniejszy poziom służy jako magazyn.



Rysunek 5.36: Habitat HESTIA, źródło:[150]



Rysunek 5.37: Habitat HESTIA, rozkład pomieszczeń, źródło: [150]

Determinanty w kształtowaniu formy analogowych habitatów kosmicznych

nazwa: HESTIA

<i>rok powstania</i>	<i>inwestor</i>	<i>projektant</i>
2015	NASA	-
<i>lokalizacja:</i>	<i>środowisko:</i>	<i>funkcja środowiska:</i>
Johnson Space Center, Floryda, USA	ekstremalne: izolacja	kontrolowane

Cechy technologiczne:

<i>typ architektury:</i>	<i>system konstrukcyjny:</i>	<i>wyzwania środowiskowe:</i>
Planetarna		Systemy podtrzymywania życia, Zagrożenia środowiskowe, wyzwania behawioralne, Inżynieria systemów
<i>typ konstrukcji:</i>	<i>HRL:</i>	<i>TRL dla symulatorów:</i>
spin-off	5	5
<i>jakość wykonania:</i>	<i>użyte materiały:</i>	<i>poziom wierności:</i>
wysoka		HF

Cechy operacyjne:

<i>liczność załogi:</i>	<i>liczba misji:</i>	<i>dni misji: średnio/maks.</i>
4	0	0/ 0
<i>status aktywności:</i>	<i>intensywność aktywności:</i>	<i>poziom wierności:</i>
testy systemu w roku 2015	sporadyczne testy	HF
<i>działania analogowe:</i>		<i>działania poza analogowe:</i>
testy analogowe/prowadzenie badań		edukacja i popularyzacja nauki/trening ludzki

Cechy naukowe:

<i>dyscyplina i obszar działalności:</i> medycyna ekstremalna i kosmiczna/ psychologia i socjologia/ IT i telemetria/ architektura i inżynieria kosmiczna/ systemy podtrzymania życia/		
<i>liczba publikacji:</i>	<i>jakość publikacji:</i>	<i>poziom wierności:</i>
umiarkowana	umiarkowana	MF

Forma:

<i>typ logistyczny:</i>	<i>formy geometryczne:</i>	<i>układ:</i>
monolityczny	cylinder	wertykalny
<i>forma przestrzenna:</i>	<i>infrastruktura:</i>	<i>teren:</i>
bryły obrotowe		

Tabela 5.23: Dane dotyczące habitatu HESTIA

nazwa: HESITA

typ: Habitat

ilość misji	A[m ²]	V[m ³]	załoga	m ² /os	m ³ /os		
0	86.3	196.98	4	21.58	49.24		
			L[m]	W[m]	H[m]	A[m ²]	V[m ³]
Habitat					8	86.3	196.98
Poziom Życiowy			10	2.7	2.1	27	56.7
<i>Stanowiska Pracy</i>			3.5	2.7	2.1	9.45	19.85
<i>Aneks Kuchenny</i>			1.5	2.7	2.1	4.05	8.51
<i>Jadalnia</i>			2	2.7	2.1	5.4	11.34
<i>Podsystemy</i>			3	2.7	2.1	8.1	17.01
Poziom Kabin Załogi				2.7	2.1	27	56.7
<i>Kabina</i>					2.1	1.9	3.99
<i>Kabina</i>					2.1	1.9	3.99
<i>Kabina</i>					2.1	1.9	3.99
<i>Kabina</i>					2.1	1.9	3.99
<i>Przechowywanie/system</i>					2.1	19.4	40.74
Poziom Operacyjny				2.7	2.1	27	56.7
<i>Komunikacja</i>					2.1	12.4	26.04
<i>stanowisko sportowe</i>					2.1	1.7	3.57
<i>stanowisko medyczne</i>					2.1	1.7	3.57
<i>stanowisko biologiczne</i>					2.1	1.7	3.57
<i>Stanowisko geologiczne</i>					2.1	1.7	3.57
<i>Stanowisko warsztatowe</i>					2.1	1.7	3.57
<i>komora laminarna</i>					2.1	1.7	3.57
<i>toaleta</i>					2.1	.7	1.47
<i>prysznic</i>					2.1	.7	1.47
<i>śluza/przech.</i>					2.1	3	6.3
<i>skafandrów</i>							
Poziom Podsystemów			32.15	2.7	1	5.3	26.88
<i>Przechowywanie/system</i>					1	4	4
<i>Komunikacja</i>					1	1.3	1.3

Typ funkcji	A[m ²]	A/os.[m ²]
komunikacja	13.7	3.43
życie	18.45	4.61
praca	19.65	4.91
podsystemy	34.5	8.63
suma	86.3	21.58

Tabela 5.24: Dane dotyczące habitatu HESTIA – ciąg dalszy



Rysunek 5.38: Ilustracja graficzna powierzchni przypadającej na określone funkcje w habitacie HESTIA

5.13 MEERS

MEERS, czyli Mobile Extreme Environment Research Station zaczęło powstawać jako projekt studencki na Embry-Riddle Aeronautical University w Daytona Beach na Florydzie [153, 154]. Kierownikiem projektu był dr Jason Kring. Projekt zakładał stworzenia symulatora habitatu kosmicznego do badania ludzkich zachowań w ekstremalnym środowisku. Habitat został stworzony na bazie przyczepy kempingowej Airstream z 1976 roku. Projekt rozpoczął się w roku 2016, jednak nie został dokończony. Dr Kring opuścił ERAU zabierając prototyp habitatu. Ukończył go niezależnie od Uniwersytetu Daytona. Jednoprzestrzenna forma przyczepy nawiązuje kształtem i rozmiarem do horyzontalnych modułów międzynarodowej stacji kosmicznej. Wewnętrzne funkcje pozwalają na pomieszczenie czteroosobowej załogi z łózkami, aneksem kuchennym, laboratorium oraz łazienką.



Rysunek 5.39: Habitat MEERS, źródło: [155]



Rysunek 5.40: Habitat MEERS, źródło: [155]

Determinanty w kształtowaniu formy analogowych habitatów kosmicznych

nazwa: MEERS

<i>rok powstania</i>	<i>inwestor</i>	<i>projektant</i>
2016	Embry-Riddle Aeronautical University	-
<i>lokalizacja:</i>	<i>środowisko:</i>	<i>funkcja środowiska:</i>
Mobilna/Pojazd	placówka mobilna	różne

Cechy technologiczne:

<i>typ architektury:</i>	<i>system konstrukcyjny:</i>	<i>wyzwania środowiskowe:</i>
Mobilna/Pojazd		Zagrożenia środowiskowe, wyzwania behawioralne, Inżynieria systemów
<i>typ konstrukcji:</i>	<i>HRL:</i>	<i>TRL dla symulatorów:</i>
spin-in	-	3
<i>jakość wykonania:</i>	<i>użyte materiały:</i>	<i>poziom wierności:</i>
niska		LF

Cechy operacyjne:

<i>liczność załogi:</i>	<i>liczba misji:</i>	<i>dni misji: średnio/maks.</i>
0	1	7/ 7
<i>status aktywności:</i>	<i>intensywność aktywności:</i>	<i>poziom wierności:</i>
nieznany	nieznany	LF
<i>działania analogowe:</i>		<i>działania poza analogowe:</i>
analogowe symulacje misji/testy analogowe/prowadzenie badań		edukacja i popularyzacja nauki/trening ludzki

Cechy naukowe:

<i>dyscyplina i obszar działalności:</i> nauki planetarne/ medycyna ekstremalna i kosmiczna/ psychologia i socjologia/ IT i telemetria/		
<i>liczba publikacji:</i>	<i>jakość publikacji:</i>	<i>poziom wierności:</i>
mała	niska	LF

Forma:

<i>typ logistyczny:</i>	<i>formy geometryczne:</i>	<i>układ:</i>
monolityczny	cylinder	horyzontalny
<i>forma przestrzenna:</i>	<i>infrastruktura:</i>	<i>teren:</i>
bryły obrotowe	zabudowania techniczne, teleskopy	lodowa pustynia

Tabela 5.25: Dane dotyczące habitatu MEERS

nazwa: MEERS

typ: Habitat

ilość misji	A[m ²]	V[m ³]	załoga	m ² /os	m ³ /os		
4	23.44	49.23	4	5.86	12.31		
			L[m]	W[m]	H[m]	A[m ²]	V[m ³]
Habitat			9.53	2.46	2.1	23.44	49.23

Typ funkcji	A[m ²]	A/os.[m ²]
komunikacja	4.69	1.17
życie	9.38	2.34
praca	7.03	1.76
podsystemy	2.34	.59
suma	23.44	5.86

Tabela 5.26: Dane dotyczące habitatu MEERS – ciąg dalszy

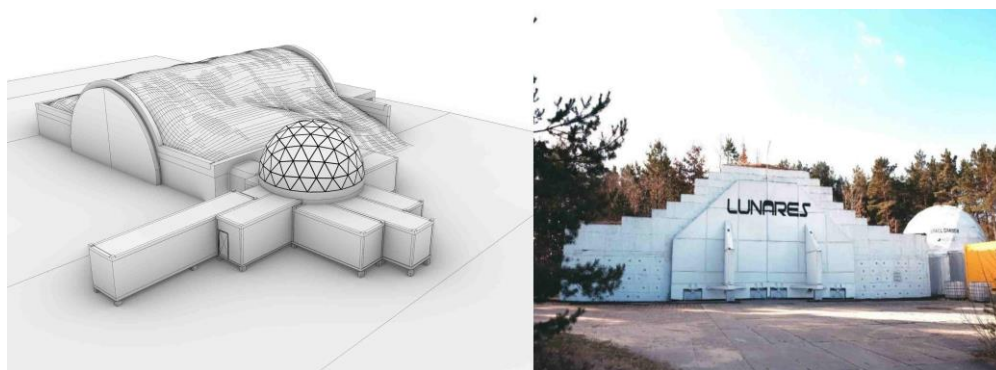


Rysunek 5.41: Ilustracja graficzna powierzchni przypadającej na określone funkcje w habitacie MEERS

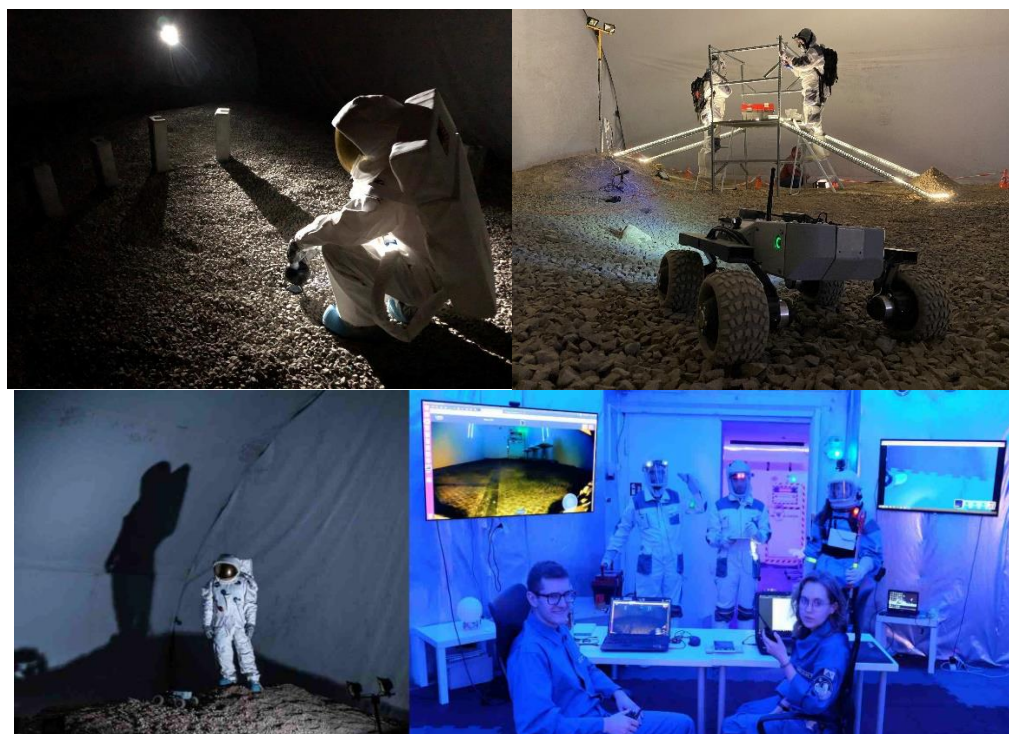
5.14 Placówka Badawcza LunAres

Polska Placówka Badawcza LunAres została utworzona w 2017 roku [156–161]. LunAres jest zaprojektowany, wykonany i nadzorowany przez autora niniejszej dysertacji. Placówka powstała w odpowiedzi na ciągle opóźnienia w realizacji projektu FlexHab Europejskiej Agencji Kosmicznej. LunAres stał się drugim po SHEE europejskim habitatem analogowym wykorzystując wtedy pustą jeszcze niszę badawczą. W przeciwieństwie do placówek kierowanych przez agencje kosmiczne, uniwersytety oraz fundacje – LunAres jest laboratorium komercyjnym, co ułatwia organizację misji przez różne grupy badawcze z całego świata. LunAres skupia się obecnie na badaniach z zakresu medycyny, psychologii oraz współpracy człowiek-robot, przy jednoczesnym rozwoju kompetencji w zakresie zrównoważonej architektury oraz systemów podtrzymywania życia. Habitat LunAres powstał na bazie pierwszego polskiego prototypu o nazwie M.A.R.S. Placówka Badawcza LunAres znajduje się na terenie byłego lotniska wojskowego 6 Pułku Lotnictwa Myśliwsko-Bombowego w Pile. Lotnisko używane przez wojsko do roku 1998. Na infrastrukturę lotniska składało się m.in 19 schronów-hangarów lotniczych zaprojektowanych z myślą o przetrwaniu fali uderzeniowej po detonacji ładunku atomowego. Placówka znajduje się blisko infrastruktury miejskiej, lecz bez dostępu dla osób postronnych. Zdecydowano się na zaprojektowanie placówki o charakterze zamkniętym.

Struktura hangaru, będącego częścią habitatu, wykonana jest z prefabrykatów żelbetowych. W bocznych przestrzeniach schrono-hangaru znajdują się pomieszczenia gospodarcze, zaś w głównej hali o powierzchni 300 m² znajduje się teren EVA służący do symulacji spacerów kosmicznych oraz zadań z wykorzystaniem robotów oraz łazików. Hala wypełniona jest 200 tonami wysokiej jakości piasku z pobliskiej fabryki szkła oraz 200 tonami mielonego bazaltu. Hala EVA ma formę kolebki o szerokości u podstawy 12,5 m, długiej na 24 m i wysokości szczytu 6 m. Hala obłożona jest wewnątrz białym ekranem, na którym rozpraszane są różne kolory światła. Schrono-hangar połączony jest z właściwym habitatem służą urządzonej na wzór śluzy służącej do opuszczania statku kosmicznego. Moduły habitatu są komercyjne dostępnymi kontenerami biurowymi oraz morskimi. Na habitat składa się obecnie sześć kontenerów biurowych oraz jeden zaadoptowany kontener morski. Tworzą one formę odrębnych horyzontalnych modułów skupionych wokół centralnej przestrzeni zwanej atrium. Przestrzeń centralna stworzona jest poprzez koliste ustawienie kontenerów i zwieńczona jest geodezyjną kopułą na aluminiowym stelażu. Atrium ma średnicę 8 m i wysokość 7 m. Jest to koncepcja symulująca użycie kompaktowej, modularnej architektury w połączeniu z rozkładaną formą centralną dającą większą przestrzeń. Habitat jest odizolowany od środowiska zewnętrznego wizualnie oraz akustycznie – nie ma też w nim okien pozwalających ustalić porę dnia. Każda przestrzeń jest wyposażona w zestaw czujników do śledzenia zmian warunków środowiskowych oraz w system monitoringu.



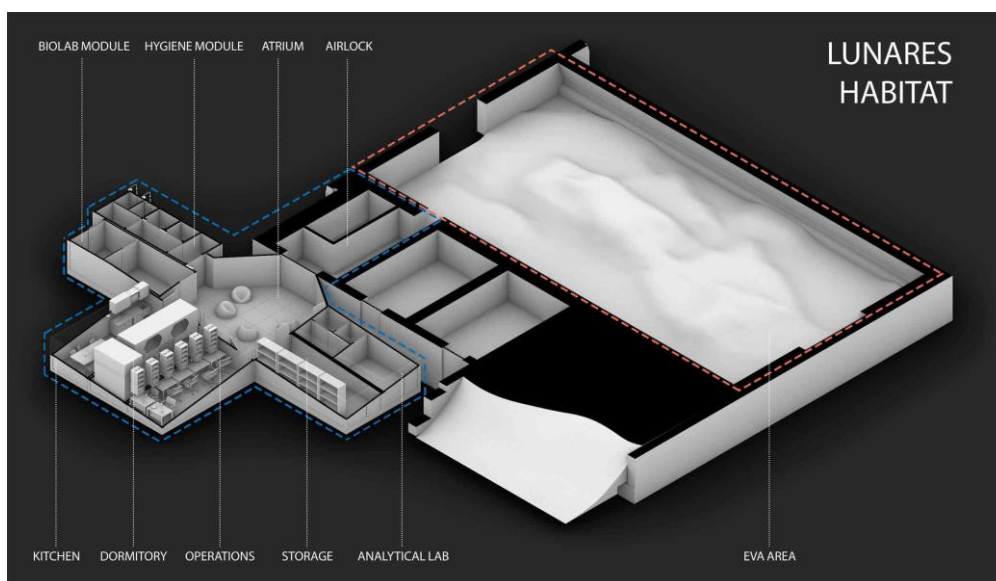
Rysunek 5.42: Habitat LunAres, prace własne



Rysunek 5.43: Habitat LunAres, prace własne



Rysunek 5.44: Habitat LunAres, prace własne



Rysunek 5.45: Habitat LunAres. Projekt pod kierownictwem autora.

nazwa: LunAres

<i>rok powstania</i>	<i>inwestor</i>	<i>projektant</i>
2017	Space Garden sp. z o.o.	Leszek Orzechowski, Space is More
<i>lokalizacja:</i>	<i>środowisko:</i>	<i>funkcja środowiska:</i>
Piła, Polska	ekstremalne: izolacja	Izolacja

Cechy technologiczne:

<i>typ architektury:</i>	<i>system konstrukcyjny:</i>	<i>wyzwania środowiskowe:</i>
Planetarna , Skafander Kosmiczny		Zagrożenia środowiskowe, wyzwania behawioralne, spacery kosmiczne
<i>typ konstrukcji:</i>	<i>HRL:</i>	<i>TRL dla symulatorów:</i>
spin-in	-	5
<i>jakość wykonania:</i>	<i>użyte materiały:</i>	<i>poziom wierności:</i>
Umiarkowana		MF

Cechy operacyjne:

<i>liczność załogi:</i>	<i>liczba misji:</i>	<i>dni misji: średnio/maks.</i>
0	30	18/ 30
<i>status aktywności:</i>	<i>intensywność aktywności:</i>	<i>poziom wierności:</i>
placówka w użyciu	regularne misje analogowe	HF
<i>działania analogowe:</i>	<i>działania poza analogowe:</i>	
analogowe symulacje misji / testy analogowe / testy technologii / zarządzanie misją / prowadzenie badań / zbieranie danych w trybie ciągłym	edukacja i popularyzacja nauki/trening ludzki/działalność komercyjna	

Cechy naukowe:

<i>dyscyplina i obszar działalności:</i> nauki planetarne/ ISRU/ robotyka/ spacery kosmiczne i EVA/ medycyna ekstremalna i kosmiczna/ psychologia i socjologia/ IT i telemetria/ produkcja żywności/ testy wyposażenia/		
<i>liczba publikacji:</i>	<i>jakość publikacji:</i>	<i>poziom wierności:</i>
umiarkowana	wysoka	HF

Forma:

<i>typ logistyczny:</i>	<i>formy geometryczne:</i>	<i>układ:</i>
modularny	kopuła, cylinder, prostokąty	planarny, centralny
<i>forma przestrzenna:</i>	<i>infrastruktura:</i>	<i>teren:</i>
wielokątne, bryły obrotowe	centrum nauki, zabudowania techniczne	infrastruktura lotnicza

Tabela 5.27: Dane dotyczące habitatu LunAres

Determinanty w kształtowaniu formy analogowych habitatów kosmicznych

nazwa: LunAres

typ: Habitat

ilość misji	A[m ²]	V[m ³]	załoga	m ² /os	m ³ /os		
16	164.27	510.63	6	27.38	85.1		
			L[m]	W[m]	H[m]	A[m ²]	V[m ³]
Habitat						164.27	510.63
Atrium			6.1	6.1	4.64	37.21	172.65
Moduł Warsztatowy			5.78	2.2	2.64	12.72	33.57
<i>warsztat mechaniczny</i>							
<i>warsztat elektroniczny</i>							
Moduł Laboratoryjny			5.78	2.2	2.64	12.72	33.57
<i>Lab. analityczne</i>							
<i>Lab. bioreaktorów</i>							
Moduł Kuchenny			5.78	2.2	2.64	12.72	33.57
Moduł Sypialny			5.78	2.2	2.64	12.72	33.57
Moduł Biurowy			5.78	2.2	2.64	12.72	33.57
Moduł Gospodarczy			5.78	2.2	2.64	12.72	33.57
<i>Magazyn</i>					2.26		
<i>Siłownia</i>					2.64		
Moduł Sanitarny			11.79	2.1	2.89	24.76	71.55
<i>przedsiónek</i>					2.5		
<i>toaleta</i>					2.5		
<i>łazienka z pralnią</i>					2.5		
<i>łaz. dla niepełnos.</i>					2.5		
<i>pom. techniczne</i>					2.5		
<i>magazyn wody</i>					2.5		
Śluza			6.5	4	2.5	26	65
<i>Magazyn EVA</i>			4.12	1.83	2.5	7.54	18.85
<i>Śluza</i>					2.5	15.74	39.35
Hala EVA			12.5	24	6	300	1800

Typ funkcji	A[m ²]	A/os.[m ²]
komunikacja	21.27	3.54
życie	57.88	14.47
praca	49.22	12.3
podsystemy	35.9	8.98

Tabela 5.28: Dane dotyczące habitatu LunAres – część dalsza tabeli



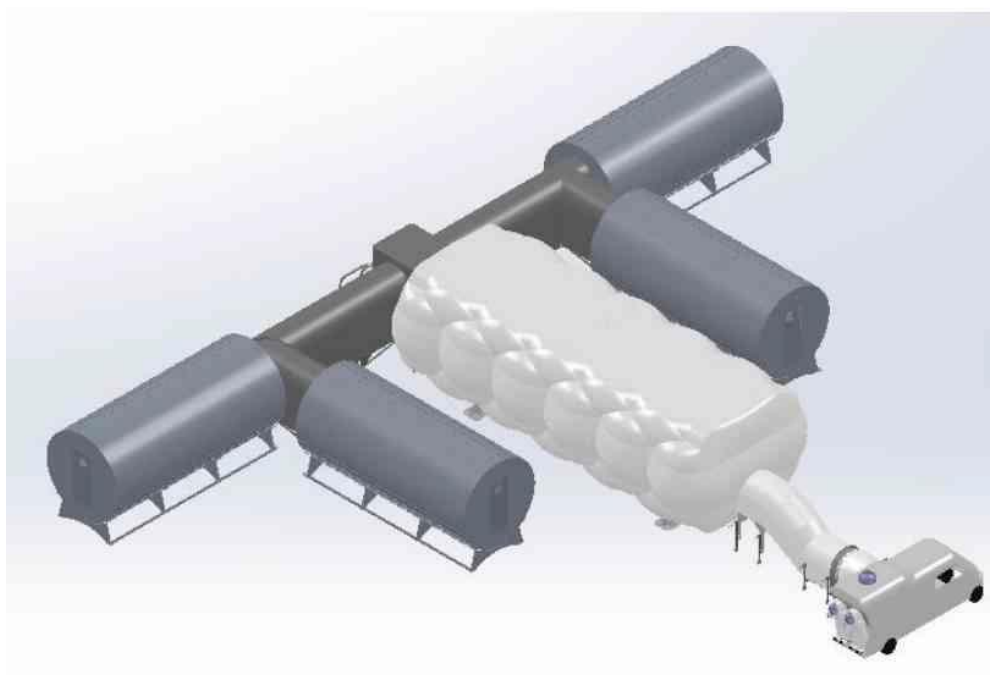
Rysunek 5.46: Ilustracja graficzna powierzchni przypadającej na określone funkcje w habitacie LunAres

5.15 ILMH

ILMH, Inflatable Lunar/Marsian Habitat, czyli Nadmuchiwany Habitat Księżycowo/Marsjański realizowany był w roku 2017 przez zespół studencki z Uniwersytetu Północnej Dakoty pod kierownictwem inżyniera Pabla de León'a [162– 167]. Celem było stworzenie analogowego habitatu służącego do badań nad zachowaniem ludzi, testów EVA oraz uprawy roślin. Habitat znajduje się w kampusie Uniwersytetu Północnej Dakoty umożliwiając sprawne prace badawcze wspomagane laboratoriami uniwersytetu. Na habitat składają się cztery horyzontalne cylindry laboratoriów, nadmuchiwany moduł mieszkalny oraz korytarze komunikacyjne. Cylindry mają promień 3 m i długość 7 m. W ich wnętrzu zaprojektowano szklarnię, moduł przygotowań do eksperymentów EVA oraz dwa magazyny adaptowane czasem na warsztaty lub laboratoria. Główny nadmuchiwany moduł mieści kwatery załogi, laboratorium, kuchnię z jadalnią oraz segment higieniczny.



Rysunek 5.47: Habitat ILMH, źródło: [162]



Rysunek 5.48: Habitat ILMH, źródło: [162]

nazwa: ILMH

<i>rok powstania</i>	<i>inwestor</i>	<i>projektant</i>
2017	Uniwersytet Północnej Dakoty	dr. Pablo de Leon
<i>lokalizacja:</i>	<i>środowisko:</i>	<i>funkcja środowiska:</i>
kampus uniwersytecki, Dakota Północna, USA	strzeżony teren	ograniczona izolacja

Cechy technologiczne:

<i>typ architektury:</i>	<i>system konstrukcyjny:</i>	<i>wyzwania środowiskowe:</i>
Planetarna, Mobilna/Pojazd, Śluza Mo-		Zagrożenia środowiskowe, wyzwania behawioralne
<i>typ konstrukcji:</i>	<i>HRL:</i>	<i>TRL dla symulatorów:</i>
spin-off	4	5
<i>jakość wykonania:</i>	<i>użyte materiały:</i>	<i>poziom wierności:</i>
umiarkowana		MF

Cechy operacyjne:

<i>liczność załogi:</i>	<i>liczba misji:</i>	<i>dni misji: średnio/maks.</i>
0	4	14/ 14
<i>status aktywności:</i>	<i>intensywność aktywności:</i>	<i>poziom wierności:</i>
placówka w użyciu	sporadyczne misje analogowe	MF
<i>działania analogowe:</i>	<i>działania poza analogowe:</i>	
analogowe symulacje misji/testy analogowe/ testy technologii /prowadzenie badań	trening ludzki	

Cechy naukowe:

<i>dyscyplina i obszar działalności:</i> nauki planetarne/ ISRU/ spacery kosmiczne i EVA/ medycyna ekstremalna i kosmiczna/ psychologia i socjologia/ IT i telemetria/ architektura i inżynieria kosmiczna/ systemy podtrzymania życia/ produkcja żywności/ biotechnologia/ testy wyposażenia/		
<i>liczba publikacji:</i>	<i>jakość publikacji:</i>	<i>poziom wierności:</i>
mała	umiarkowana	MF

Forma:

<i>typ logistyczny:</i>	<i>formy geometryczne:</i>	<i>układ:</i>
modularny	cylinder	horyzontalny
<i>forma przestrzenna:</i>	<i>infrastruktura:</i>	<i>teren:</i>
bryły obrotowe	uczelnia badawcza	kampus uczelni

Tabela 5.29: Dane dotyczące habitatu ILMH

nazwa: ILMH

typ: Habitat

ilość misji	A[m ²]	V[m ³]	załoga	m ² /os	m ³ /os
4	141.8	367.46	4	35.45	91.86

	L[m]	W[m]	H[m]	A[m ²]	V[m ³]
Habitat				141.8	367.46
Moduł 1 – Szklarnia	7	3	2.7	21	56.7
Moduł 2- EVA	7	3	2.7	21	56.7
Moduł 3	7	3	2.7	21	56.7
Moduł 4	7	3	2.7	21	56.7
Moduł Mieszkalny	10	2.7	2.7	27	72.9
<i>Laboratorium</i>	3.5	2.7	2.7	9.45	25.52
<i>Higiena</i>	1.5	2.7	2.7	4.05	10.94
<i>Kuchnia/Jadalnia</i>	2	2.7	2.7	5.4	14.58
<i>Kwatery Załogi</i>	3	2.7	2.7	8.1	21.87
Komunikacja	14	2.2	2.2	30.8	67.76

Typ funkcji	A[m ²]	A/os.[m ²]
komunikacja	47.45	11.86
życie	14.92	3.73
praca	70.09	17.52
podsystemy	9.35	2.34
suma	141.8	35.45

Tabela 5.30: Dane dotyczące habitatu ILMH- część dalsza



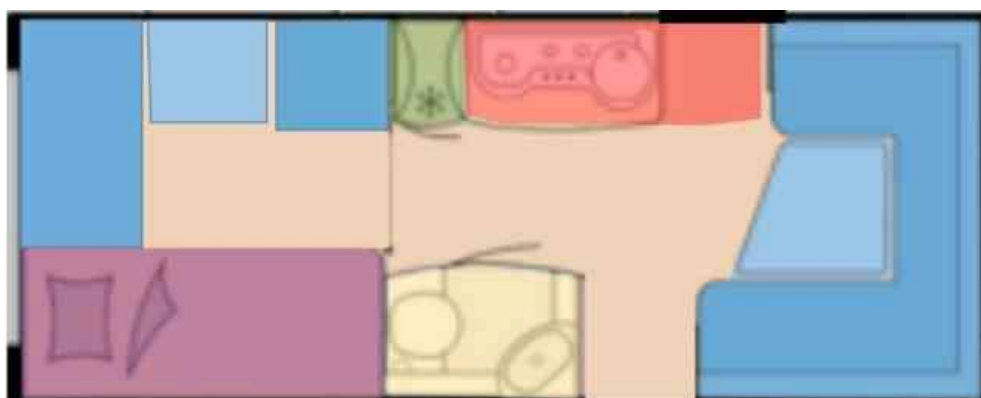
Rysunek 5.49: Ilustracja graficzna powierzchni przypadającej na określone funkcje w habitacie ILMH

5.16 ExoHab

ExoHab ESTEC jest kolejnym przykładem przyczepy kempingowej zaadaptowanej na laboratorium [168, 169]. Od przyczepy kempingowej różni się umownością podziału funkcji.



Rysunek 5.50: habitat ExoHab, źródło: [169]



Rysunek 5.51: Habitat ExoHab, źródło: [169]

nazwa: ExoHab

<i>rok powstania</i>	<i>inwestor</i>	<i>projektant</i>
2017	EuroMoonMars	-
<i>lokalizacja:</i>	<i>środowisko:</i>	<i>funkcja środowiska:</i>
ESTEC, Holandia	placówka mobilna	-

Cechy technologiczne:

<i>typ architektury:</i>	<i>system konstrukcyjny:</i>	<i>wyzwania środowiskowe:</i>
Planetarna , Mobilna / Pojazd		Zagrożenia środowiskowe, wyzwania behawioralne
<i>typ konstrukcji:</i>	<i>HRL:</i>	<i>TRL dla symulatorów:</i>
spin-in	-	3
<i>jakość wykonania:</i>	<i>użyte materiały:</i>	<i>poziom wierności:</i>
niska		LF

Cechy operacyjne:

<i>liczność załogi:</i>	<i>liczba misji:</i>	<i>dni misji: średnio/maks.</i>
0	4	4/ 4
<i>status aktywności:</i>	<i>intensywność aktywności:</i>	<i>poziom wierności:</i>
placówka w użyciu do 2019	sporadyczne testy	LF
<i>działania analogowe:</i>		<i>działania poza analogowe:</i>
testy analogowe/prowadzenie badań		edukacja i popularyzacja nauki/trening ludzki

Cechy naukowe:

<i>dyscyplina i obszar działalności:</i> medycyna ekstremalna i kosmiczna/psychologia i socjologia/		
<i>liczba publikacji:</i>	<i>jakość publikacji:</i>	<i>poziom wierności:</i>
umiarkowana	umiarkowana	LF

Forma:

<i>typ logistyczny:</i>	<i>formy geometryczne:</i>	<i>układ:</i>
monolityczny	graniastosłup	centralny
<i>forma przestrzenna:</i>	<i>infrastruktura:</i>	<i>teren:</i>
wielościenny		

Tabela 5.31: Dane dotyczące habitatu ExoHab

nazwa: ExoHab

typ: Habitat

ilość misji	A[m ²]	V[m ³]	załoga	m ² /os	m ³ /os		
8	13.5	47.25	2	6.75	23.62		
Habitat			L[m]	W[m]	H[m]	A[m²]	V[m³]
			4.5	3	3.5	13.5	47.25
Typ funkcji		A[m ²]	A/os.[m ²]				
komunikacja		2.7	1.35				
życie		5.4	1.35				
praca		4.05	1.01				
podsystemy		1.35	.34				
suma		13.5	3.38				

Tabela 5.32: Dane dotyczące habitatu ExoHab. Dalsza część tabeli



Rysunek 5.52: Ilustracja graficzna powierzchni przypadającej na określone funkcje habitatu ExoHab

5.17 Kepler Station

W roku 2018 Austriackie Forum Kosmiczne na potrzeby kampanii analogowej AMEDEE-18 stworzyła kontenerowe miasteczko z 17 wynajętych kontenerów mieszkalnych oraz morskich z nadmuchiwaną strukturą symulującą habitat kosmiczny [170–174]. Miasteczko zamieszkiwała grupa ponad 20 naukowców wraz z 6 analogowymi astronautami. Kontenery mieściły funkcje magazynowe, biurowe, mieszkalne, gastronomiczne oraz higieniczne. Struktura nadmuchiwana była jedynie przestrzenią pozwalającą wykonywać testy analogowe. Nie posiadała instalacji, podłogi, drzwi oraz oświetlenia. Cała kampania skupiona była wokół serii testów analogowych wykonywanych osobno, a nie w ramach analogowej symulacji misji.

Ze względu na nieużytkowy charakter habitatu i brak wewnątrz przypisanych funkcji nie jest on obiektem poddawany analizie funkcjonalnej.

Habitat powstał na pustynnym obszarze Dhofar w Omanie. Pustynia zapewniała doskonale warunki dla testów analogowych związanych z testami EVA.

Moduły miasteczka tworzyły komercyjnie dostępne kontenery morskie oraz mieszkalne. Komercyjnie dostępne pneumatyczne namioty tworzyły symulowany habitat.



Rysunek 5.53: Kepler Station, źródło: [175]



Rysunek 5.54: Kepler Station, źródło: [175]



Rysunek 5.55: Kepler Station, źródło: [175]

nazwa: Kepler

<i>rok powstania</i>	<i>inwestor</i>	<i>projektant</i>
2018	Austrian Space Forum	-
<i>lokalizacja:</i>	<i>środowisko:</i>	<i>funkcja środowiska:</i>
Oman	ekstremalne: pustynia	testy terenowe

Cechy technologiczne:

<i>typ architektury:</i>	<i>system konstrukcyjny:</i>	<i>wyzwania środowiskowe:</i>
Planetarna		wyzwania behawioralne, spacery kosmiczne
<i>typ konstrukcji:</i>	<i>HRL:</i>	<i>TRL dla symulatorów:</i>
spin-in	-	3
<i>jakość wykonania:</i>	<i>użyte materiały:</i>	<i>poziom wierności:</i>
Umiarkowana		LF

Cechy operacyjne:

<i>liczność załogi:</i>	<i>liczba misji:</i>	<i>dni misji: średnio/maks.</i>
0	1	20/ 20
<i>status aktywności:</i>	<i>intensywność aktywności:</i>	<i>poziom wierności:</i>
placówka nieaktywna	jedna misja analogowa	MF
<i>działania analogowe:</i>	<i>działania poza analogowe:</i>	
analogowe symulacje misji / testy analogowe / testy technologii / zarządzanie misją / prowadzenie badań / zbieranie danych w trybie ciągłym		

Cechy naukowe:

<i>dyscyplina i obszar działalności:</i> nauki planetarne/ ISRU/ robotyka/ spacery kosmiczne i EVA/ medycyna ekstremalna i kosmiczna/ psychologia i socjologia/ IT i telemetria/ testy wyposażenia/		
<i>liczba publikacji:</i>	<i>jakość publikacji:</i>	<i>poziom wierności:</i>
umiarkowana	wysoka	HF

Forma:

<i>typ logistyczny:</i>	<i>formy geometryczne:</i>	<i>układ:</i>
modularny	kopuła	planarny
<i>forma przestrzenna:</i>	<i>infrastruktura:</i>	<i>teren:</i>
bryły obrotowe	kontenery dla obsługi naukowej	teren pustynny

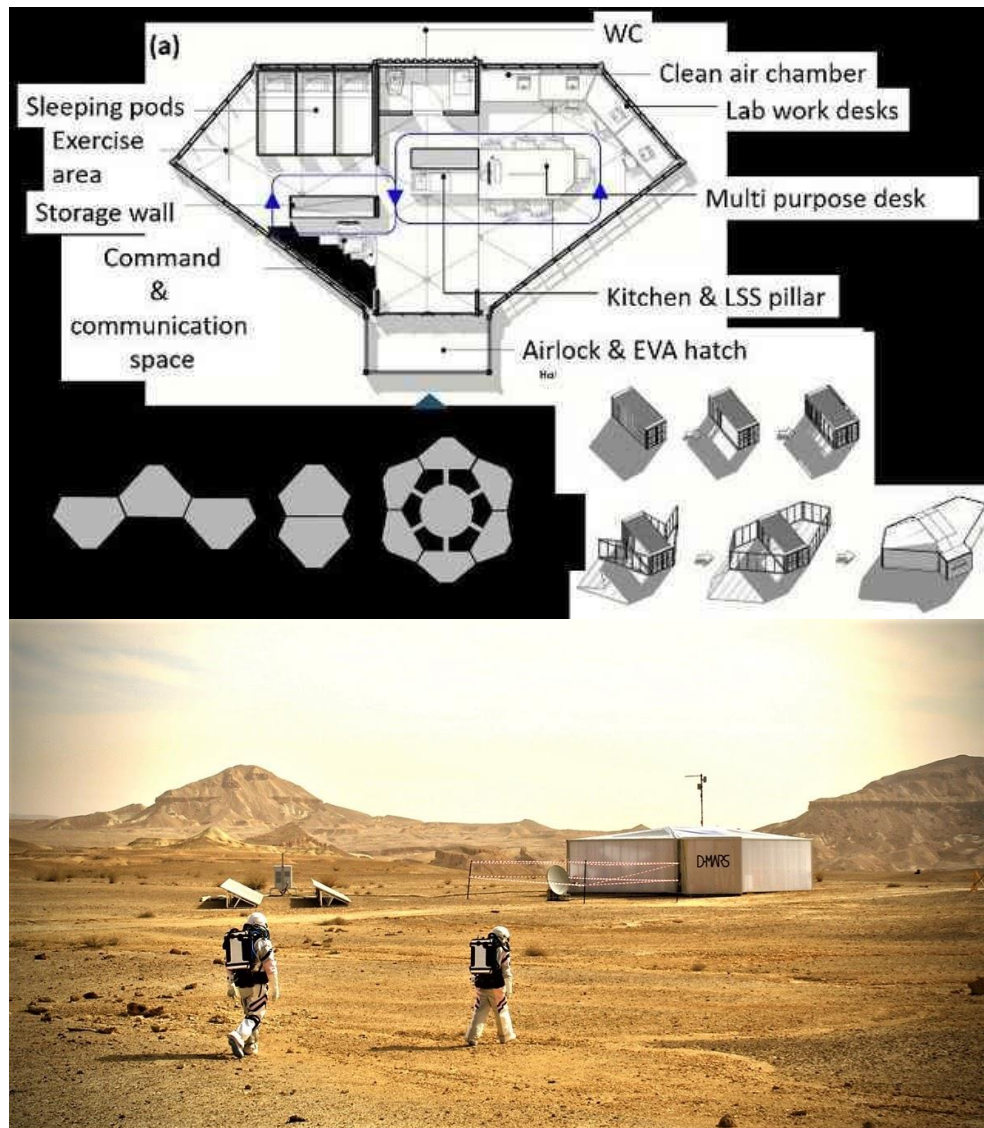
Tabela 5.33: Dane dotyczące stacji Kepler

5.18 D-Mars

D-Mars, czyli Desert Mars Analog Ramon Station tłumaczyć można jako Pustynna Marsjańska Stacja Analogowa *Ramon* [176–178]. Placówka powstała w 2018 roku w Izraelu. Przeprowadzono w niej trzy misje analogowe. Jest to mała placówka, która jednak w roku 2021 miała zostać rozwinięta na potrzeby misji AMADEE-20. Jest to kolejna misja Austrian Space Forum, która wcześniej stworzyła Stację Keplera w Omanie na potrzeby AMADEE-18. W czasie trwania odbytych misji analogowych załogi prowadziły warsztaty oraz badania z zakresu procedur spacerów kosmicznych EVA, komunikacji między załogami habitatów D-Mars oraz Stacji Keplera w Omanie, druku 3D oraz badań psychologicznych. Habitat analogowy umiejscowiony został w kraterze Ramon na pustyni Nagev w Izraelu. Krater Ramon jest formacją powstałą w wyniku erozji i jest jednym z największych kanionów pudełkowych. D-Mars to niewielki habitat stworzony z połączenia dwóch kontenerów morskich o długości 6 metrów posiadających dodatkowe zadaszenie z tkaniny technicznej. W założeniu projektantów jest to przykład modułowej oraz rozkładanej architektury. Wewnątrz habitatu jest 40 m² powierzchni, na którą składa się przestrzeń życiowa, załogowa, laboratorium oraz moduł naukowy. Stalowa konstrukcja kontenerów morskich oraz pokrycie płócienne są jedynym zabezpieczeniem załogi przed środowiskiem pustynnym. Bardziej zaawansowane wyposażenie badawcze jest dostarczane na potrzeby poszczególnych misji analogowych bezpośrednio przed misjami. Projekt powstał w roku 2019 przy współpracy z duńskimi architektami odpowiedzialnymi również za projekt habitatu LunArk.



Rysunek 5.56: Habitat D-Mars, źródło: [175]



Rysunek 5.57: Habitat D-Mars, źródło: [175]

nazwa: D-Mars

<i>rok powstania</i>	<i>inwestor</i>	<i>projektant</i>
2018	D-Mars.com / dr Hagi Ben-Israel	-
<i>lokalizacja:</i>	<i>środowisko:</i>	<i>funkcja środowiska:</i>
Pustynia Nagev, Izrael	ekstremalne: pustynne	testy terenowe

Cechy technologiczne:

<i>typ architektury:</i>	<i>system konstrukcyjny:</i>	<i>wyzwania środowiskowe:</i>
Planetarna		Zagrożenia środowiskowe, wyzwania behawioralne, spacery kosmiczne
<i>typ konstrukcji:</i>	<i>HRL:</i>	<i>TRL dla symulatorów:</i>
spin-in	-	5
<i>jakość wykonania:</i>	<i>użyte materiały:</i>	<i>poziom wierności:</i>
umiarkowana		MF

Cechy operacyjne:

<i>liczność załogi:</i>	<i>liczba misji:</i>	<i>dni misji: średnio/maks.</i>
4	7	14/ 14
<i>status aktywności:</i>	<i>intensywność aktywności:</i>	<i>poziom wierności:</i>
placówka w użyciu	sporadyczne misje analogowe	MF
<i>działania analogowe:</i>		<i>działania poza analogowe:</i>
analogowe symulacje misji / testy analogowe / prowadzenie badań		edukacja i popularyzacja nauki/trening ludzki/działalność komercyjna

Cechy naukowe:

<i>dyscyplina i obszar działalności:</i> nauki planetarne/ ISRU/ robotyka/ spacery kosmiczne i EVA/ medycyna ekstremalna i kosmiczna/ psychologia i socjologia/ IT i telemetria/ architektura i inżynieria kosmiczna/ systemy podtrzymania życia/ produkcja żywności/ biotechnologia/ testy wyposażenia/		
<i>liczba publikacji:</i>	<i>jakość publikacji:</i>	<i>poziom wierności:</i>
mała	umiarkowana	MF

Forma:

<i>typ logistyczny:</i>	<i>formy geometryczne:</i>	<i>układ:</i>
monolityczny	graniastosłup	centralny
<i>forma przestrzenna:</i>	<i>infrastruktura:</i>	<i>teren:</i>
wielościanny	brak	pustynia

Tabela 5.34: Dane dotyczące habitatu D-Mars

nazwa: D-Mars

typ: Habitat

ilość misji	A[m ²]	V[m ³]	załoga	m ² /os	m ³ /os
4	62	165.8	6	10.33	27.63

	L[m]	W[m]	H[m]	A[m ²]	V[m ³]
Habitat				62	165.8
Moduł załogowy			2.6	16	41.6
Moduł Życiowy			2.6	15	39
Moduł naukowy			2.6	17	44.2
Laboratorium			3	14	41

Typ funkcji	A[m ²]	A/os.[m ²]
komunikacja	15	2.5
życie	15	3.75
praca	23	5.75
podsystemy	9	2.25
suma	62	15.5

Tabela 5.35: Dane dotyczące habitatu D-Mars. Dalsza część tabeli.



Rysunek 5.58: Ilustracja graficzna powierzchni przypadającej na określone funkcje dla habitatu D-Mars

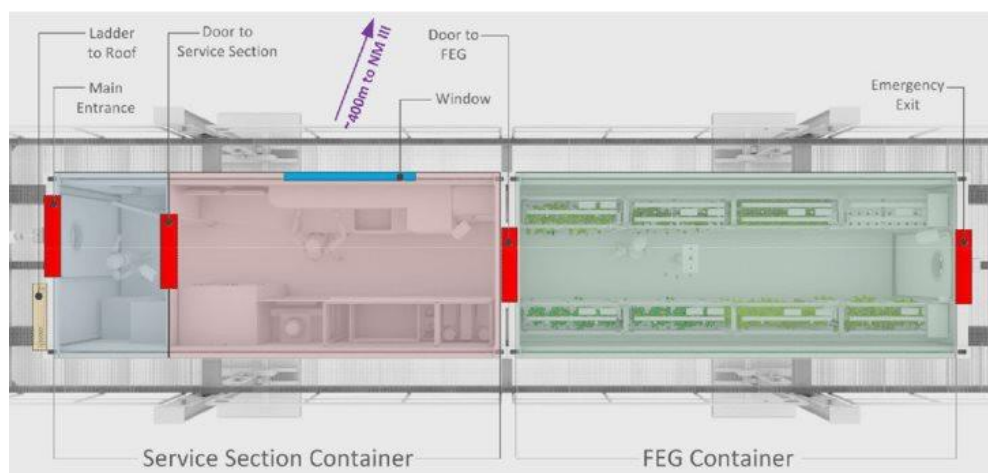
5.19 EDEN-ISS

Projekt modułu do bezglebowej uprawy żywności był w latach 2015–2019 finansowany z programu Komisji Europejskiej Horyzont 2020. [179–183], obecnie finansowany jest z innych źródeł. Program był realizowany przez konsorcjum kilku europejskich uniwersytetów, Niemiecką Agencję Kosmiczną, firmę architektoniczną Liquifer Systems Group oraz firmy związane z przemysłem kosmiczno-lotniczym

Airbus i Thales Alenia. Celem było zaprojektowanie prototypu szklarni kosmicznej mogącej działać w trudnych antarktycznych warunkach. Integracja modułów odbywała się w laboratoriach Niemieckiej Agencji Kosmicznej w Bremie. Habitat został potem był przetransportowany w sąsiedztwo niemieckiej stacji antarktycznej Neumayer III, gdzie przez 2 lata odbywały się testy sprawności systemu. Kontener wykonany jest ze stali, izolacja termiczna wykonana z poliuretanu. Systemy habitatu pozwalają sterować światłem LED, wilgotnością oraz temperaturą powietrza, pompami podającymi wodę z pożywką, jak również kamerami oraz liczniki poboru mocy do monitorowania upraw i sprawności jednostki. EDEN- ISS ma postać pojedynczego modułu-kontenera morskiego o długości 12,03 m, szerokości 2,35 m oraz wysokości 2,39 m. Na Antarktydzie został posadowiony na platformie podniesionej o 1,5m względem lodowca celem sprawniejszej izolacji termicznej. Wnętrze podzielone jest na trzy funkcjonalne sekcje: przedsionek o powierzchni 3,5 m², sekcję serwisową, o powierzchni 10,5 m², do przygotowania pożywki oraz wysiewania nasion oraz sekcję upraw FEG ("Future Exploration Greenhouse") o powierzchni 14 m².



Rysunek 5.59: Habitat EDEN-ISS, źródło: [149]



Rysunek 5.60: Habitat EDEN-ISS, źródło: [149]

nazwa: EDEN ISS

<i>rok powstania</i>	<i>inwestor</i>	<i>projektant</i>
2018	EU	Barbara Imhof
<i>lokalizacja:</i>	<i>środowisko:</i>	<i>funkcja środowiska:</i>
Antarktyda	ekstremalne: arktyczne	prawdziwe środowisko ekstremalne

Cechy technologiczne:

<i>typ architektury:</i>	<i>system konstrukcyjny:</i>	<i>wyzwania środowiskowe:</i>
Planetarna, Mobilna / Pojazd		Systemy podtrzymywania życia, Zagrożenia środowiskowe, wyzwania behawioralne
<i>typ konstrukcji:</i>	<i>HRL:</i>	<i>TRL dla symulatorów:</i>
spin-off	6	6
<i>jakość wykonania:</i>	<i>użyte materiały:</i>	<i>poziom wierności:</i>
wysoka		HF

Cechy operacyjne:

<i>liczność załogi:</i>	<i>liczba misji:</i>	<i>dni misji: średnio/maks.</i>
0	3	365/ 365
<i>status aktywności:</i>	<i>intensywność aktywności:</i>	<i>poziom wierności:</i>
placówka sprowadzona do Niemiec	ciągłe testy uprawy żywności	HF
<i>działania analogowe:</i>	<i>działania poza analogowe:</i>	
testy technologii/prowadzenie badań/zbieranie danych w trybie ciągłym	edukacja i popularyzacja nauki/trening ludzki	

Cechy naukowe:

<i>dyscyplina i obszar działalności:</i>	nauki planetarne/ systemy podtrzymania życia/ produkcja żywności/ biotechnologia/	
<i>liczba publikacji:</i>	<i>jakość publikacji:</i>	<i>poziom wierności:</i>
umiarkowana	umiarkowana	HF

Forma:

<i>typ logistyczny:</i>	<i>formy geometryczne:</i>	<i>układ:</i>
monolityczny	graniastosłup	horyzontalny
<i>forma przestrzenna:</i>	<i>infrastruktura:</i>	<i>teren:</i>
wielościanny	stacja arktyczna	lodowa pustynia

Tabela 5.36: Dane dotyczące habitatu EDEN ISS

nazwa: EDEN ISS

typ: Habitat

ilość misji	A[m ²]	V[m ³]	załoga	m ² /os	m ³ /os
4	28.27	67.57	2	14.14	33.78

	L[m]	W[m]	H[m]	A[m ²]	V[m ³]
Habitat	12.03	2.35	2.39	28.27	67.57
Przedsiönek	1.5	2.35	2.39	3.53	8.42
Sekcja Serwisowa	4.5	2.35	2.39	10.58	25.27
Sekcja Upraw (FEG)	6	2.35	2.39	14.1	33.7

Typ funkcji	A[m ²]	A/os.[m ²]
komunikacja	4.24	2.12
życie	0	0
praca	8.48	2.12
podsystemy	15.55	3.89
suma	28.27	7.07

Tabela 5.37: Dane dotyczące habitatu EDEN ISS – dalsza część tabeli

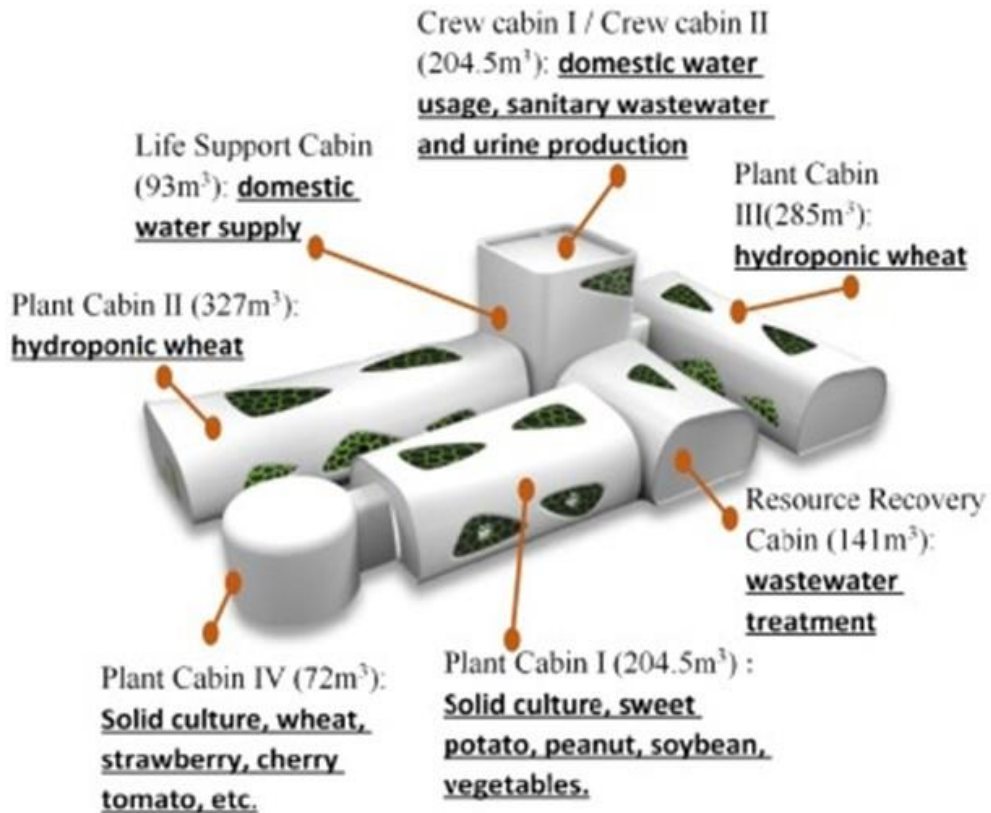


Rysunek 5.61: Ilustracja graficzna powierzchni przypadającej na określone funkcje w habitacie EDEN ISS

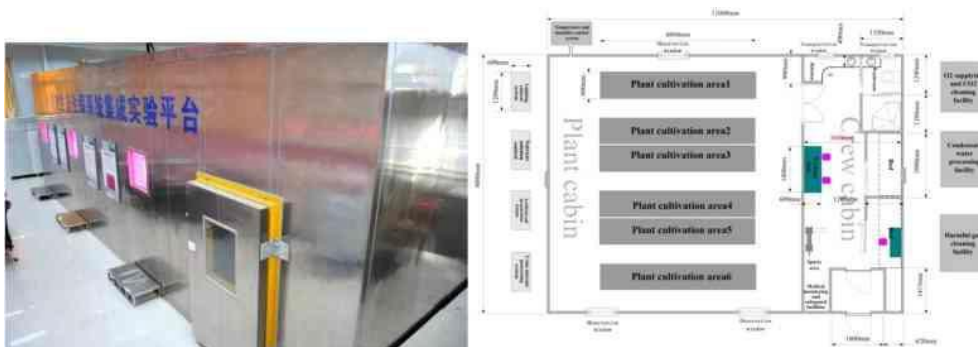
5.20 CELSS

CELSS czyli Controlled Ecological Life Support System to platforma stworzona przez Chińskie Centrum Treningu i Badań Astronautów w Pekinie ok. 2018 roku [184–188]. Nie ma odstępnych zbyt wielu informacji dotyczących jej struktury. Z dostępnych materiałów da się wywnioskować o skali, formie i konstrukcji, różnią się one jednak od futurystycznych kształtów prezentowanych na ilustracjach poglądowych. Z publikacji medycznych opublikowanych po misjach analogowych w CELSS można wywnioskować, że jest to wyspecjalizowana placówka do badań nad biologicznymi systemami podtrzymywania życia i telemetrii zdrowia ludzkiego. Mieści ona czterech analogowych astronautów. Placówka znajduje się prawdopodobnie wewnątrz hal Chińskiego Centrum Treningu i Badań Astronautów w Pekinie. Zdjęcie obiektu przedstawia jeden z czterech modułów upraw, o czym świadczy różowa poświata świateł LED. Zdjęcie połączone jest z rzutem, który przedstawia inny rozkład funkcji niż oficjalna grafika. W tym przypadku habitat składa się z jednego modułu upraw bezpośrednio połączonego z modułem załogowym. Warto zauważyć, że ilustracja ta pochodzi z okresu badań wstępnych, podczas których starano się poznać zależności między ilością upraw a zapotrzebowaniem załogi na powietrze w czasie trzydziestodniowych misji. Główne badania odbywały się podczas misji półrocznej i wedle literatury, odbywały się w większej infrastrukturze. Można założyć, iż dostępne informacje pokazują rozkład funkcjonalny obecnie działającej placówki, a zdjęcia z testów przedstawiają technologię i formę modułów z okresu jej rozwoju. Habitat posiada prawdopodobnie cztery moduły upraw – dwa do upraw hydroponicznych oraz dwa do upraw glebowych – każdy o różnej objętości. Habitat posiada również moduł uzdatniania wody oraz dwupoziomowy moduł załogi. Wymiary przedstawione w tabelach 5.39 są szacowane z dostępnych zdjęć. Objętość CELSS to ok. 1327 m³, z czego większość przeznaczona jest pod uprawy⁵.

⁵<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6766369/>, dostęp grudzień 2022



Rysunek 5.62: Habitat CELLS, źródło: [184]



Rysunek 5.63: Habitat CELLS, źródło:[184]

nazwa: CELSS

<i>rok powstania</i>	<i>inwestor</i>	<i>projektant</i>
2018	Chińskie Centrum Treningu i Badań Astronautów	-
<i>lokalizacja:</i>	<i>środowisko:</i>	<i>funkcja środowiska:</i>
Chiny, Pekin	ekstremalne: izolacja	Izolacja

Cechy technologiczne:

<i>typ architektury:</i>	<i>system konstrukcyjny:</i>	<i>wyzwania środowiskowe:</i>
Planetarna		Systemy podtrzymywania życia, wyzwania behawioralne, Inżynieria systemów
<i>typ konstrukcji:</i>	<i>HRL:</i>	<i>TRL dla symulatorów:</i>
spin-off	5	-
<i>jakość wykonania:</i>	<i>użyte materiały:</i>	<i>poziom wierności:</i>
umiarkowana		MF

Cechy operacyjne:

<i>liczność załogi:</i>	<i>liczba misji:</i>	<i>dni misji: średnio/maks.</i>
0	2	45/ 45
<i>status aktywności:</i>	<i>intensywność aktywności:</i>	<i>poziom wierności:</i>
placówka w użyciu od 2018	sporadyczne testy	MF
<i>działania analogowe:</i>	<i>działania poza analogowe:</i>	
analogowe symulacje misji/testy technologii/prowadzenie badań	edukacja i popularyzacja nauki/trening ludzki	

Cechy naukowe:

<i>dyscyplina i obszar działalności:</i> nauki planetarne/ medycyna ekstremalna i kosmiczna / produkcja żywności/ biotechnologia/		
<i>liczba publikacji:</i>	<i>jakość publikacji:</i>	<i>poziom wierności:</i>
umiarkowana	umiarkowana	MF

Forma:

<i>typ logistyczny:</i>	<i>formy geometryczne:</i>	<i>układ:</i>
modularny	prostokątów	planarny
<i>forma przestrzenna:</i>	<i>infrastruktura:</i>	<i>teren:</i>
wielokątowy		

Tabela 5.38: Dane dotyczące habitatu CELSS

nazwa: CELSS

typ: Habitat

ilość misji	A[m ²]	V[m ³]	załoga	m ² /os	m ³ /os
4	530.8	1327	4	132.7	331.75

	L[m]	W[m]	H[m]	A[m ²]	V[m ³]
Habitat			2.5	530.8	1327
Moduł załogowy			2.5	81.8	204.5
Moduł Sys. Podtrzymywania Życia			2.5	37.2	93
Moduł Upraw Hydroponicznej 1			2.5	130.8	327
Moduł Upraw Hydroponicznej 1			2.5	114	285
Moduł Uzdatniania Wody			2.5	56.4	141
Moduł Upraw Glebowych 1			2.5	81.8	204.5
Moduł Upraw Glebowych 2			2.5	28.8	72

Typ funkcji	A[m ²]	A/os.[m ²]
komunikacja	53.08	13.27
życie	73.62	18.4
praca	134.7	33.67
podsystemy	269.4	67.35
suma	530.8	132.7

Tabela 5.39: Dane dotyczące habitatu CELSS, dalsza część tabeli



Rysunek 5.64: Ilustracja graficzna powierzchni przypadającej na określone funkcje habitatu CELSS

5.21 MAMBA

Moon and Mars Base Analog, czyli Analog Bazy Księżycowo-Marsjańskiej powstał w 2019 roku z inicjatywy dr Christiane Henicke z Niemiec [189-193]. Dr Henicke uczestnicząc wcześniej w analogowych misjach w MDRS, LunAres Research Station oraz Hi-SEAS (w tym w słynnej misji nr 5 trwającej pełen rok) zdecydowała się stworzyć habitat analogowy, który nie byłby umowną przestrzenią zaadaptowaną do funkcji, ale formą zaprojektowaną z myślą o ergonomii i realiach misji pozaziemskiej. Według jej słów MaMBA ma być bliższa ergonomicznego prototypu bazy pozaziemskiej, niż placówki na Ziemi. W tym celu zdobyła grant w instytucie ZARM (Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation) działającym przy Uniwersytecie Technicznym w Bremie. Celem projektu jest zaprojektowanie koncepcji habitatu złożonego z 6 identycznych modułów oraz wykonanie prototypu wybranego modułu. Będzie to moduł laboratoryjny do badań nad ergonomią oraz procedurami badawczymi. Do zespołu projektowego zostali zaproszeni inżynierowie i projektanci z Europejskiej Agencji Kosmicznej oraz twórcy innych habitatów analogowych, w tym autor poniższej dysertacji. Pierwszy modelowy element habitatu MaMBA posiada formę wertykalnego cylindra – kapsuły o średnicy 5,2 m i wysokości 6,5 m. Rozmiary te zostały dobrane ze względu na dwa podstawowe czynniki, którymi są: a/ rozłożenie i umiejscowienie funkcji i systemów wewnątrz habitatu b/ ograniczenie objętości i masy, dla dostosowania habitatu do istniejących systemów raketowych mogących wynosić ładunki poza niską orbitę Ziemi. Habitat będzie testowany w próżniowej wieży spadku swobodnego w Bremie, co będzie symulowało niskie ciśnienie panujące w kosmosie. Struktura została tak zaprojektowana aby wytrzymała dużą różnicę między ciśnieniem zewnętrznym i wewnętrznym. Wnętrze habitatu jest dwunastościanem foremny o średnicy 4,2 m. Wnętrze podzielone jest na dwa poziomy o wysokości 2,2 m z przestrzeniami ładunkowymi o wysokości 60 cm pod podłogą poziomą pierwszego i sufitem poziomą drugiego. Na pierwszym poziomie znajduje się laboratorium biologiczno-geologiczne z możliwością wydzielenia osobnych pomieszczeń. Na poziomie drugim znajduje się wspólna przestrzeń biurowa do pracy. Na obu poziomach funkcje zostały ulokowane w dedykowanym systemie rozkładanych ram-szaf odpowiadających rozmiarami międzynarodowemu standardowi szaf ładunkowych będących w wyposażeniu stacji kosmicznej.



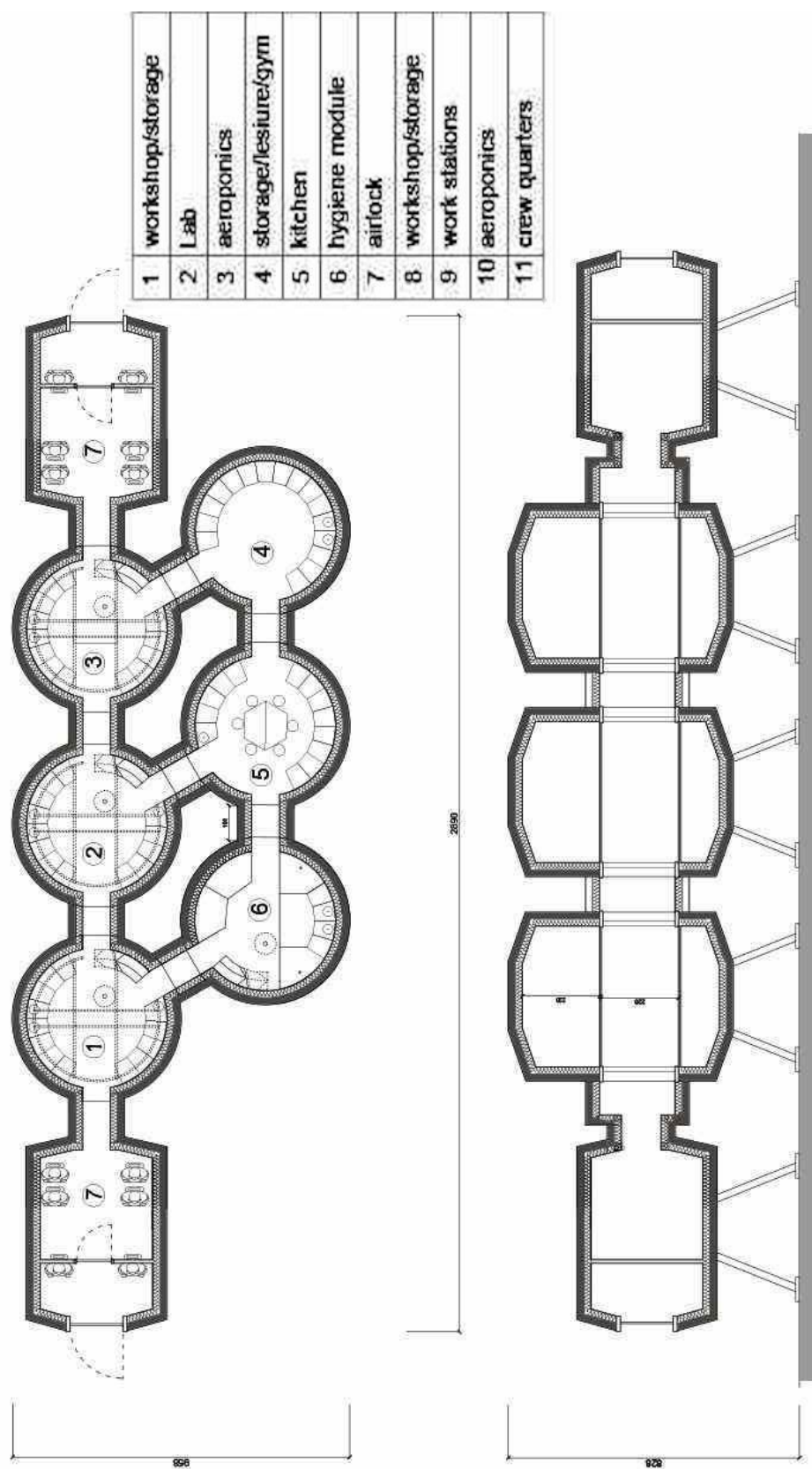
Rysunek 5.65: Habitat MAMBA, zdjęcie udostępnione przez dr Ch.Henicke



Rysunek 5.66: Habitat MAMBA, wizualizacja autora



Rysunek 5.67: Habitat MAMBA, wizualizacja autora



Rysunek 5.68: Habitat MAMBA. Wizualizacja pomieszczeń, wizualizacja autora

nazwa: MAMBA

<i>rok powstania</i>	<i>inwestor</i>	<i>projektant</i>
2019	ZARM	C. Henicke / L. Orzechowski
<i>lokalizacja:</i>	<i>środowisko:</i>	<i>funkcja środowiska:</i>
ZARM, Brema, Niemcy	ekstremalne: izolacja	izolacja

Cechy technologiczne:

<i>typ architektury:</i>	<i>system konstrukcyjny:</i>	<i>wyzwania środowiskowe:</i>
Planetarna		Systemy podtrzymywania życia, Inżynieria systemów
<i>typ konstrukcji:</i>	<i>HRL:</i>	<i>TRL dla symulatorów:</i>
spin-off	3	4
<i>jakość wykonania:</i>	<i>użyte materiały:</i>	<i>poziom wierności:</i>
umiarkowana		MF

Cechy operacyjne:

<i>liczność załogi:</i>	<i>liczba misji:</i>	<i>dni misji: średnio/maks.</i>
0	1	1/ 1
<i>status aktywności:</i>	<i>intensywność aktywności:</i>	<i>poziom wierności:</i>
placówka w użyciu do 2019	sporadyczne testy	LF
<i>działania analogowe:</i>		<i>działania poza analogowe:</i>
testy analogowe/prowadzenie badań		edukacja i popularyzacja nauki/trening ludzki

Cechy naukowe:

<i>dyscyplina i obszar działalności:</i> nauki planetarne/ ISRU/ IT i telemetria/ architektura i inżynieria kosmiczna/ testy wyposażenia/		
<i>liczba publikacji:</i>	<i>jakość publikacji:</i>	<i>poziom wierności:</i>
umiarkowana	umiarkowana	MF

Forma:

<i>typ logistyczny:</i>	<i>formy geometryczne:</i>	<i>układ:</i>
monolityczny	cylinder	wertykalny
<i>forma przestrzenna:</i>	<i>infrastruktura:</i>	<i>teren:</i>
bryły obrotowe		

Tabela 5.40: Dane dotyczące habitatu MAMBA

nazwa: MaMBA Moduł No1

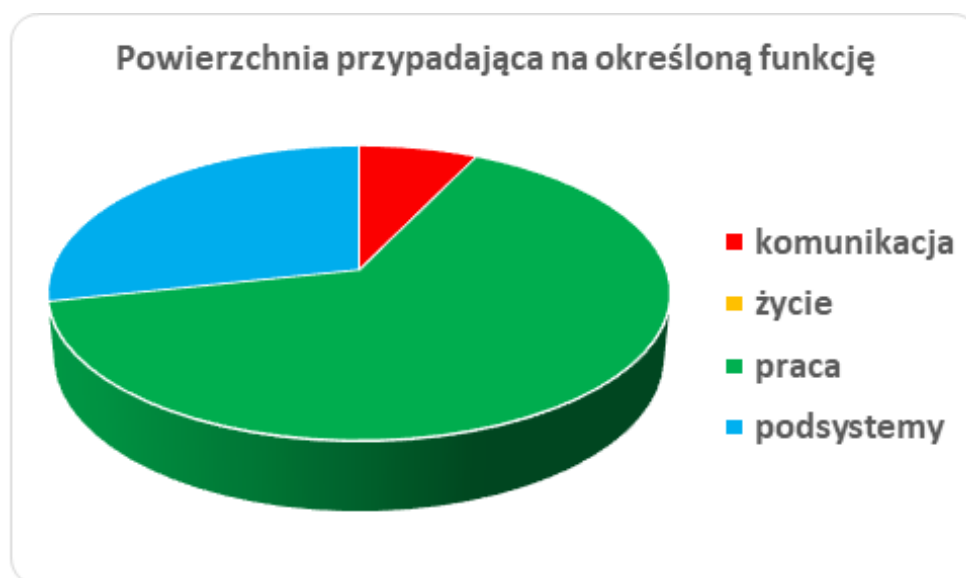
typ: Habitat bryła

ilość misji	A[m ²]	V[m ³]	załoga	m ² /os	m ³ /os
2	42.45	137.97	2	21.23	68.99

	L[m]	W[m]	H[m]	A[m ²]	V[m ³]
Habitat bryła	5.2	2.6	6.5	42.45	137.97
Habitat wewnątrz	4.4	2.2	4.6	30.4	69.91
Level 1 Laboratorium	4.4	2.2	2.3	15.2	34.95
Level 2 Pracownia	4.4	2.2	2.3	15.2	34.95

Typ funkcji	A[m ²]	A/os.[m ²]
komunikacja	3.04	1.52
życie	0	0
praca	27.36	6.84
podsystemy	12.06	3.01
suma	42.45	10.61

Tabela 5.41: Dane dotyczące habitatu MAMBA. Moduł No1



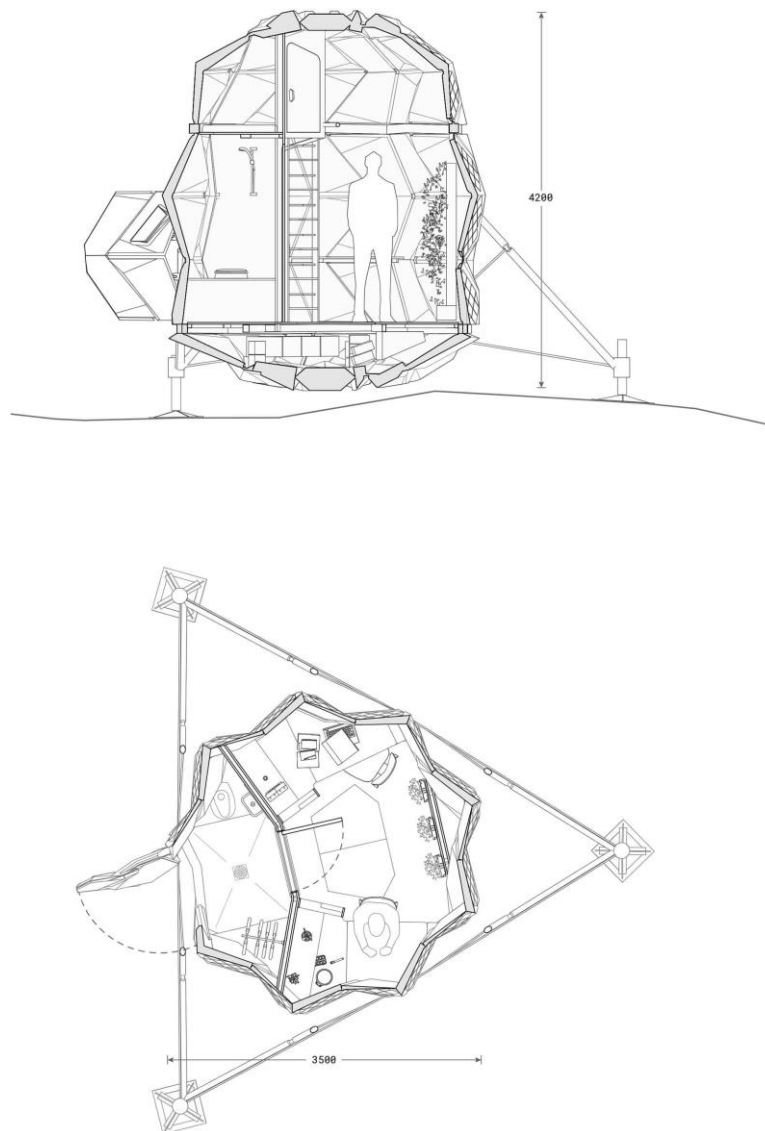
Rysunek 5.69: Ilustracja graficzna powierzchni przypadającej na określone funkcje habitatu MaMBA, Moduł No1

5.22 LUNARK^[194-196]

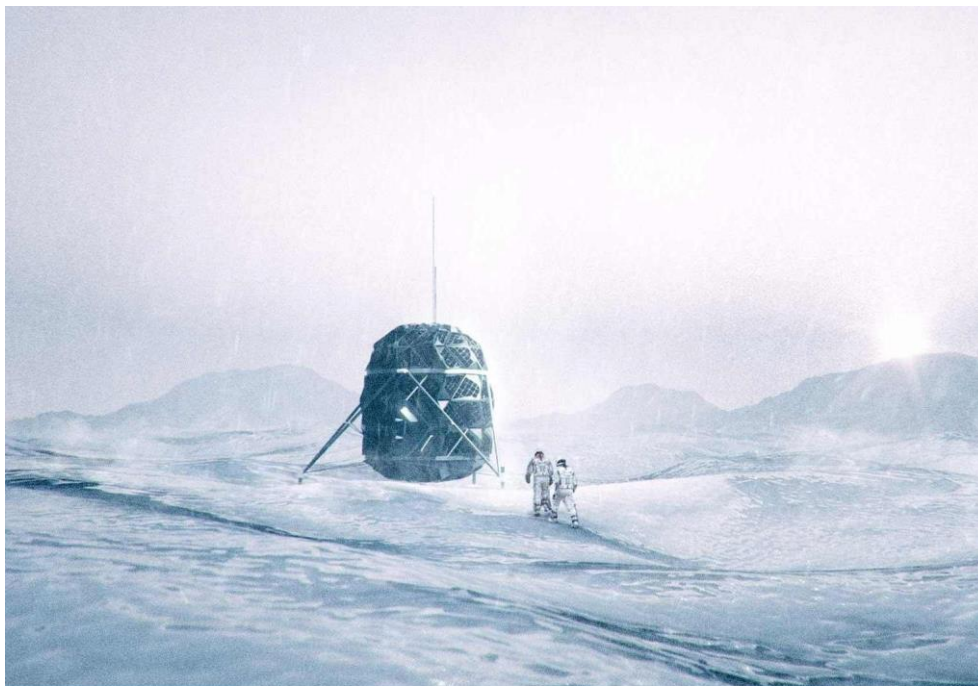
Habitat Lunkark jest projektem firmy SAGA Space Architects stworzony w 2019 roku jako inicjatywa zespołu projektowego [194-196]. Jest to dwuosobowa rozkładana struktura, która rozwija do dużej, owalnej formy z sztywną skorupą z włókna węglowego. Czarna, błyszcząca skorupa z włókna węglowego stanowi główną zewnętrzną powierzchnię habitatu. Strukturę z włókna węglowego stanowią panele typu sandwich z rdzeniem z pianki dla dodatkowej izolacji.

Determinanty w kształtowaniu formy analogowych habitatów kosmicznych

Zostało użyte włókno węglowe, ponieważ jest lekkie co było kluczowe dla transportu i rozwijania – a jednocześnie wytrzymałe. Panele są połączone składaną gumą kompozytową. Główną strukturę nośną stanowi rama z aluminium. Struktura jest prototypem logistycznym, a głównym celem projektu było przetestowanie potencjału rozkładanych struktur w kosmicznej architekturze. Lunark został przewieziony na lodowiec na Grenlandii, gdzie dwójka projektantów spędziła w nim 90 dni podczas arktycznej misji analogowej. Habitat posiada trzy poziomy. Dolna kopuła kapsuły służy za magazyn sprzętu, zapasów oraz baterii, środkowy cylinder to przestrzeń dzienna, natomiast kopuła górna kapsuły zawiera dwie małe sypialnie. Obecnie habitat znajduje się w muzeum w Danii.



Rysunek 5.70: Habitat Lunark, źródło: [197]



Rysunek 5.71: Habitat Lunark, źródło: [197]

nazwa: LunArk

<i>rok powstania</i>	<i>inwestor</i>	<i>projektant</i>
2019	zbiórka społeczna	SAGA Space Architects
<i>lokalizacja:</i>	<i>środowisko:</i>	<i>funkcja środowiska:</i>
mobilny: Grenlandia	ekstremalne: arktyczne	prawdziwe środowisko ekstremalne

Cechy technologiczne:

<i>typ architektury:</i>	<i>system konstrukcyjny:</i>	<i>wyzwania środowiskowe:</i>
Planetarna , Mobilna / Pojazd		Zagrożenia środowiskowe, wyzwania behawioralne
<i>typ konstrukcji:</i>	<i>HRL:</i>	<i>TRL dla symulatorów:</i>
spin-off	4	4
<i>jakość wykonania:</i>	<i>użyte materiały:</i>	<i>poziom wierności:</i>
umiarkowana		MF

Cechy operacyjne:

<i>liczność załogi:</i>	<i>liczba misji:</i>	<i>dni misji: średnio/maks.</i>
0	1	60/ 60
<i>status aktywności:</i>	<i>intensywność aktywności:</i>	<i>poziom wierności:</i>
placówka w muzeum	jedna misja analogowe	MF
<i>działania analogowe:</i>		<i>działania poza analogowe:</i>
testy analogowe		edukacja i popularyzacja nauki

Cechy naukowe:

<i>dyscyplina i obszar działalności:</i> psychologia i socjologia/ architektura i inżynieria kosmiczna		
<i>liczba publikacji:</i>	<i>jakość publikacji:</i>	<i>poziom wierności:</i>
umiarkowana	umiarkowana	MF

Forma:

<i>typ logistyczny:</i>	<i>formy geometryczne:</i>	<i>układ:</i>
monolityczny	kapsuła	wertykalny
<i>forma przestrzenna:</i>	<i>infrastruktura:</i>	<i>teren:</i>
wielościanny		lodowa pustynia

Tabela 5.42: Dane dotyczące habitatu LunArk

nazwa: Lunark

typ: Habitat

ilość misji	A[m ²]	V[m ³]	załoga	m ² /os	m ³ /os
1	12.3	19.95	2	6.15	9.98

	L[m]	W[m]	H[m]	A[m ²]	V[m ³]
Poziom 1			2.1	7.5	15.75
Przestrzeń wielofunkcyjna			2.1	5.5	11.55
Śluza z łazienka			2.1	2	4.2
Poziom 2			1	4.8	4.8
Sypialnia			1	3.5	3.5
Podsystemy			1	1.3	1.3

Typ funkcji	A[m ²]	A/os.[m ²]
komunikacja	0.4	0.2
życie	8.25	2.06
praca	1.3	0.32
podsystemy	2.35	0.59
suma	12.3	3.08

Tabela 5.43: Dane dotyczące habitatu LunArk, dalsza część tabeli



Rysunek 5.72: Ilustracja graficzna powierzchni przypadającej na określone funkcje habitatu LUNARK

5.23 Hydronaut H03 DeepLab [198, 199]

Hydronaut DeepLab to czesko-słowacka stacja badawcza i szkoleniowa zbudowana w 2019 i przeznaczona do krótkoterminowego pobytu niewielkich grup nurków pod

wodą. Stacja została zaprojektowana do szerokiego spektrum badań, począwszy od wpływu izolacji i ekstremalnych warunków środowiskowych na psychikę człowieka, aż po testowanie technologii działających pod ekstremalnym ciśnieniem. Dzięki unikalnej konstrukcji umożliwiającej dynamiczną zmianę głębokości stacji, jej zastosowanie jest wyjątkowo szerokie. Obejmuje to programy badawcze i szkoleniowe, badania medycyny hiperbarycznej i psychologiczne, rozwój i testowanie technologii, IRS, szkolenie specjalnych jednostek wojskowych czy agencji kosmicznych. Hydronaut DeepLab funkcjonuje niezależnie, ale może też stanowić część większych struktur. Placówka była zanurzona w kamieniołomie Jesenný w Republice Czeskiej, gdzie stacja była połączona z powierzchnią flotą, centrum kontrolnym i bazą logistyczną. Projekt Hydronaut został zaakceptowany do programu inkubatora ESA BIC w 2020 roku. W roku 2023 obiekt został wyciągnięty na powierzchnię.



Rysunek 5.73: Habitat Hydronaut H03 DeepLab, źródło: [200]

nazwa: Hydronaut

<i>rok powstania</i>	<i>inwestor</i>	<i>projektant</i>
2019	Projekt Hydronaut / UE	-
<i>lokalizacja:</i>	<i>środowisko:</i>	<i>funkcja środowiska:</i>
Czechy	ekstremalne: podwodne	środowisko ekstremalne: podwodne

Cechy technologiczne:

<i>typ architektury:</i>	<i>system konstrukcyjny:</i>	<i>wyzwania środowiskowe:</i>
Mobilna/Pojazd		Systemy podtrzymywania życia, Inżynieria systemów
<i>typ konstrukcji:</i>	<i>HRL:</i>	<i>TRL dla symulatorów:</i>
spin-in	7	6
<i>jakość wykonania:</i>	<i>użyte materiały:</i>	<i>poziom wierności:</i>
wysoka		HF

Cechy operacyjne:

<i>liczność załogi:</i>	<i>liczba misji:</i>	<i>dni misji: średnio/maks.</i>
0	3	5/ 5
<i>status aktywności:</i>	<i>intensywność aktywności:</i>	<i>poziom wierności:</i>
2019–2023 pod wodą - obecnie wynurzony	sporadyczne testy	HF
<i>działania analogowe:</i>		<i>działania poza analogowe:</i>
testy analogowe/prowadzenie badań		edukacja i popularyzacja nauki/trening ludzki

Cechy naukowe:

<i>dyscyplina i obszar działalności:</i> medycyna ekstremalna i kosmiczna/psychologia i socjologia/ systemy podtrzymania życia/		
<i>liczba publikacji:</i>	<i>jakość publikacji:</i>	<i>poziom wierności:</i>
umiarkowana	umiarkowana	MF

Forma:

<i>typ logistyczny:</i>	<i>formy geometryczne:</i>	<i>układ:</i>
monolityczny	cylinder	horyzontalny
<i>forma przestrzenna:</i>	<i>infrastruktura:</i>	<i>teren:</i>
Bryły obrotowe		Akwen wodny / teren uczelni

Tabela 5.44: Dane dotyczące habitatu Hydronaut DeepLab

nazwa: Hydronaut

typ: Habitat

liczba misji	A[m ²]	V[m ³]	załoga	m ² /os	m ³ /os
4	7	20	3	2.33	6.67

Typ funkcji	A[m ²]	A/os.[m ²]
komunikacja	1.4	0.47
życie	2.8	0.7
praca	2.1	0.52
podsystemy	0.7	0.18
suma	7	1.75

Tabela 5.45: Dane dotyczące habitatu Hydronaut DeepLab, dalsza część tabeli

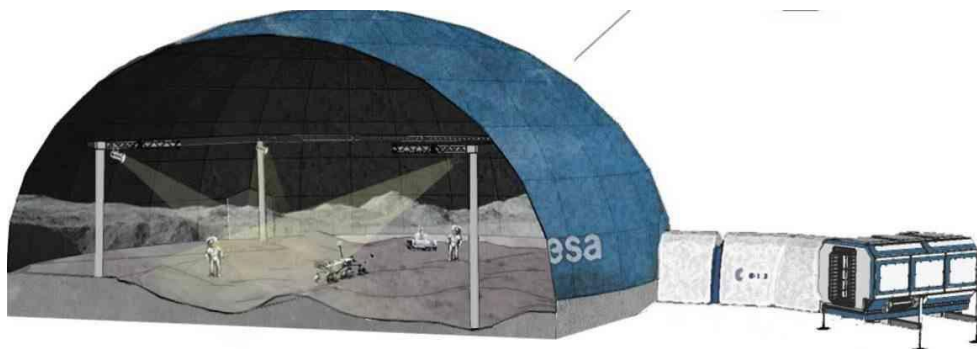


Rysunek 5.74: Ilustracja graficzna powierzchni przypadającej na określone funkcje habitatu Hydronaut DeepLab

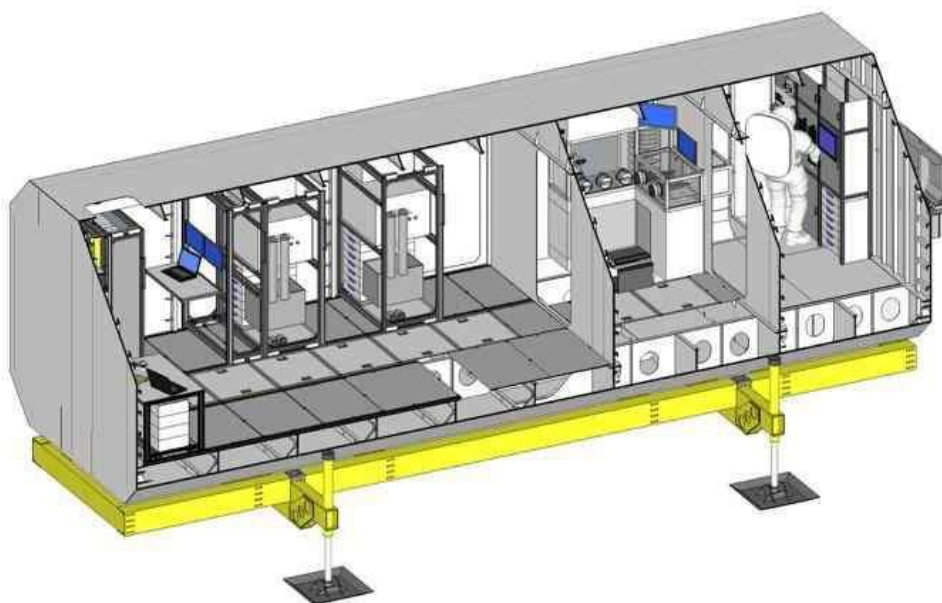
5.24 FlexHab i Luna

FlexHab to planowany habitat analogowy Europejskiej Agencji Kosmicznej [201,202]. Powstać ma w Europejskim Centrum Astronautów w Kolonii i będzie się składał się z dwóch komponentów: laboratorium FlexHab oraz hali EVA LUNA. Placówka ma pomóc rozwijać technologie związane z eksploracją Księżyca, produkcją struktur z symulantu regolitu księżycowego, badaniem współpracy człowiek-robot oraz testowaniem potencjału naukowego modułu FlexHab. Habitat nie będzie służył do stałego przebywania ludzi, jest to platforma do pracy w ciągu dnia roboczego. FlexHab oraz EVA Luna powstanie w bezpośrednim sąsiedztwie zabudowań Europejskiego Centrum Astronautów, gdzie znajduje się oddział treningu astronautów, dział medycyny kosmicznej oraz hala NBF (Neutral Boyancy Facility) będąca europejskim głębokim basenem do

treningu spacerów kosmicznych na zanurzonych replikach modułów Międzynarodowej Stacji Kosmicznej. Lokalizacja jest interesująca z uwagi na bliskość wulkanicznego krateru zawierającego przyszły materiał symulujący regolit księżycowy. Lokalizacja również jest powodem opóźnień w realizacji projektu z uwagi na znajdujące się w okolicy zagrożone gatunki jaszczurek. Moduł FlexHab będzie stalowym horyzontalnym modułem o kontrolowanym środowisku. Będzie stworzony na bazie 6 metrowego kontenera morskiego. Wnętrze będzie podzielone na trzy strefy funkcjonalne: mała słuza z infrastrukturą sanitarną, laboratorium z laminarami oraz otwarta przestrzeń możliwa do aranżacji. Możliwość różnej aranżacji przestrzeni jest ważnym elementem projektu, co zostało odzwierciedlone w nazwie placówki FlexHab. Moduł będzie połączony korytarzem słuzy z infrastrukturą hali LUNA, ale nie zdecydowano się jednak jeszcze na ostateczną formę oraz konstrukcję. EVA będzie miała powierzchnię 1000 m² pokryta zostanie symulantem regolitu księżycowego. Trwają dyskusje, czy LUNA ma być strukturą namiotową, nadmuchiwaną, czy też mieścić się w hali.



Rysunek 5.75: Habitat Flexhab i Luna, źródło: [201]



Rysunek 5.76: Habitat Flexhab i Luna, źródło: [201]

Determinanty w kształtowaniu formy analogowych habitatów kosmicznych

nazwa: Flexhab

<i>rok powstania</i>	<i>inwestor</i>	<i>projektant</i>
2023	ESA	-
<i>lokalizacja:</i>	<i>środowisko:</i>	<i>funkcja środowiska:</i>
Kolonia, Niemcy	kontrolowane: izolacja	hala do testów EVA i terenowych

Cechy technologiczne:

<i>typ architektury:</i>	<i>system konstrukcyjny:</i>	<i>wyzwania środowiskowe:</i>
Planetarna , Mobilna / Pojazd, Skafander Kosmiczny		Zagrożenia środowiskowe, wyzwania behawioralne, spacery kosmiczne , Inżynieria systemów
<i>typ konstrukcji:</i>	<i>HRL:</i>	<i>TRL dla symulatorów:</i>
spin-in	4	5
<i>jakość wykonania:</i>	<i>użyte materiały:</i>	<i>poziom wierności:</i>
umiarkowana		HF

Cechy operacyjne:

<i>liczność załogi:</i>	<i>liczba misji:</i>	<i>dni misji: średnio/maks.</i>
0	0	0/ 0
<i>status aktywności:</i>	<i>intensywność aktywności:</i>	<i>poziom wierności:</i>
placówka w realizacji	brak	HF
<i>działania analogowe:</i>	<i>działania poza analogowe:</i>	
Testy analogowe / testy technologii / zarządzanie misją / prowadzenie badań	edukacja i popularyzacja nauki/trening ludzki	

Cechy naukowe:

<i>dyscyplina i obszar działalności:</i> nauki planetarne/ ISRU/ robotyka/ spacery kosmiczne i EVA/ medycyna ekstremalna i kosmiczna/ psychologia i socjologia/ IT i telemetria/ testy wyposażenia/		
<i>liczba publikacji:</i>	<i>jakość publikacji:</i>	<i>poziom wierności:</i>
umiarkowana	wysoka	MF

Forma:

<i>typ logistyczny:</i>	<i>formy geometryczne:</i>	<i>układ:</i>
monolityczny, mieszany	kopuła, graniastosłup	horyzontalny
<i>forma przestrzenna:</i>	<i>infrastruktura:</i>	<i>teren:</i>
wielościanny, bryły obrotowe	Europejskie Centrum Astronautów	Luna - hala EVA

Tabela 5.46: Dane dotyczące habitatu Flexhab

nazwa: Luna i Flexhab

typ: Habitat wewnątrz

ilość misji	A[m ²]	V[m ³]	załoga	m ² /os	m ³ /os		
0	19.84	47.62	2	9.92	23.81		
Habitat wewnątrz			L[m]	W[m]	H[m]	A[m ²]	V[m ³]
Habitat wewnątrz			6.2	3.2	2.4	19.84	47.62
Typ funkcji		A[m ²]	A/os.[m ²]				
komunikacja		2.98	1.49				
życie		0	0				
praca		14.88	3.72				
podsystemy		1.98	0.5				
suma		19.84	4.96				

Tabela 5.47: Dane dotyczące habitatu Luna i Flexhab



Rysunek 5.77: Luna i Flexhab, ilustracja graficzna powierzchni przypadającej na określone funkcje

5.25 MDA

Mars Dune Alpha (MDA) zaprojektowała na zlecenie NASA projektantka Melodie Yashar z firmy ICON przy współpracy z firmą BIG [203, 204]. Habitat został ukończony na początku 2023 roku, a jego struktura została wydrukowana w technologii 3D. Habitat ma symulować realistyczny habitat na Marsie, wspierający długotrwałe eksploracyjne misje kosmiczne. Układ habitatu został zaprojektowany tak, aby zapewnić osobne obszary dla życia i pracy. Jest on przewidziany dla 4 członków załogi. Strefowanie funkcji dzieli habitat na prywatną strefę cichą z pokojami załogi oddzielnymi od części dziennej, strefą sanitarną oraz przestrzenią upraw zieleni. Habitat posiada dostęp do małej

przestrzeni do symulacji EVA o powierzchni ok. 70 m². Trzy załogi zostaną wybrane do rocznej misji na pokładzie MDA. Każda będzie składać się z czterech osób i dwóch rezerwowych. Celem misji będzie ocena system żywniowego NASA na stacjach kosmicznych, jak również wpływ długich misji na fizyczne i psychiczne zdrowie załogi. Badania prowadzone w habitacie MDA będą wykorzystywane przez do oceny ryzyka i wypracowania sposobów wspierania zdrowia i wydajności załogi podczas długotrwałej misji na Marsie.



Mars Dune Alpha



Rysunek 5.78: Habitat Mars Dune Alpha. Widok i plan wnętrza, źródło: [205]

nazwa: MDA

<i>rok powstania</i>	<i>inwestor</i>	<i>projektant</i>
2023	NASA	ICON, BIG
<i>lokalizacja:</i>	<i>środowisko:</i>	<i>funkcja środowiska:</i>
Johnsons Space Center, Floryda USA	ekstremalne: izolacja	kontrola, izolacja

Cechy technologiczne:

<i>typ architektury:</i>	<i>system konstrukcyjny:</i>	<i>wyzwania środowiskowe:</i>
Planetarna		wyzwania behawioralne
<i>typ konstrukcji:</i>	<i>HRL:</i>	<i>TRL dla symulatorów:</i>
spin-in	4	5
<i>jakość wykonania:</i>	<i>użyte materiały:</i>	<i>poziom wierności:</i>
wysoka		HF

Cechy operacyjne:

<i>liczność załogi:</i>	<i>liczba misji:</i>	<i>dni misji: średnio/maks.</i>
0	1	365/ 365
<i>status aktywności:</i>	<i>intensywność aktywności:</i>	<i>poziom wierności:</i>
placówka w użyciu od 2023	początek działalności	HF
<i>działania analogowe:</i>	<i>działania poza analogowe:</i>	
analogowe symulacje misji/testy analogowe / testy technologii/ zarządzanie misją / prowadzenie badań / zbieranie danych w trybie ciągłym	edukacja i popularyzacja nauki/trening ludzki	

Cechy naukowe:

<i>dyscyplina i obszar działalności:</i> nauki planetarne/ medycyna ekstremalna i kosmiczna/ psychologia i socjologia/ IT i telemetria/ architektura i inżynieria kosmiczna/ biotechnologia/		
<i>liczba publikacji:</i>	<i>jakość publikacji:</i>	<i>poziom wierności:</i>
brak	brak	HF

Forma:

<i>typ logistyczny:</i>	<i>formy geometryczne:</i>	<i>układ:</i>
monolityczny	prostokątów	planarny
<i>forma przestrzenna:</i>	<i>infrastruktura:</i>	<i>teren:</i>
wielościenny	centrum badawcze	mała przestrzeń EVA

Tabela 5.48: Dane dotyczące habitatu MDA

nazwa: Mars Dune Alpha

typ: Habitat

ilość misji	A[m ²]	V[m ³]	załoga	m ² /os	m ³ /os
1	132.2	317.28	4	33.05	79.32
			H[m]	A[m ²]	V[m ³]
Część Mieszkalna			2.4	46.9	112.56
<i>Pokoje załogi</i>			2.4	26.4	63.36
<i>Łazienka</i>			2.4	5.7	13.68
<i>komunikacja</i>			2.4	8	19.2
<i>Uprawy 1</i>			2.4	3.4	8.16
<i>Uprawy 2</i>			2.4	3.4	8.16
Część Wspólna			2.4	32.1	77.04
<i>Kuchnia i jadalnia</i>			2.4	15	36
<i>Wypoczynek</i>			2.4	17.1	41.04
Część Pracy			2.4	53.2	127.68
<i>Biuro</i>			2.4	27	64.8
<i>Siłownia</i>			2.4	6.8	16.32
<i>Łazienka</i>			2.4	6.6	15.84
<i>Gabinet lekarski</i>			2.4	8	19.2
<i>Stanowisko łączności</i>			2.4	4.8	11.52

Typ funkcji	A[m ²]	A/os.[m ²]
komunikacja	14	3.5
życie	71	17.75
praca	41.84	10.46
podsystemy	5.36	1.34
suma	132.2	33.05

Tabela 5.49: Dane dla Mars Dune Alpha, dalsza część tabeli



Rysunek 5.79: Ilustracja graficzna powierzchni przypadającej na określone funkcje w habitacie MDA.

5.26 SAM

Projekt SAM powstały w 2023 roku i jest prowadzony przez dr Kai Staatsa, Dyrektora ds. Badań Biosphere 2 na Uniwersytecie Arizona [206]. SAM to hermetycznie zamknięty, ciśnieniowy habitat składający się z warsztatu, kuchni, kwater załogi oraz sanitariatów. Fragmentem kompleksu SAM jest w pełni funkcjonalna śluza powietrzna wyposażona w komputerowo sterowany i aktywowany elektrycznie system regulacji ciśnienia. Konstrukcja habitatu oparta jest na kontenerach morskich oraz na prototypie Biosphere-2 z 1987 roku. Wspomniany prototyp pełni funkcję kontrolowanego środowiska do produkcji żywności. Na czas trwania misji naukowych monitorowane i regulowane są takie parametry jak: zawartość dwutlenku węgla, tlenu, wilgotność, temperatura i ciśnienie. Kierownictwo projektu zakłada, że odwiedzający habitat naukowcy będą prowadzić projekty badawcze dotyczące: biologii, fizjologii roślin, chemii regolitu, ekologii gleby, hodowli żywności, sztucznej inteligencji, robotyki, psychologii i inne. Czteroosobowe zespoły mogą przebywać w SAM do kilku miesięcy, natomiast pozostali członkowie zespołu mogą przebywać na terenie kampusu Biosphere-2 korzystając z dedykowanego Centrum Operacji Misji oraz miejsca zakwaterowania. Planowana jest rotacja załogi pomiędzy Centrum Operacji Misji a SAM, co daje każdemu członkowi zespołu możliwość pracy w obu środowiskach. Obok habitatu znajduje się hala o powierzchni 600 m² przeznaczona na symulacje EVA. Wychodzenie w skafandrach ciśnieniowych jest wspierane przez personel SAM, co może utrudniać badania izolacyjne. W maju 2023 roku odbyły się pierwsze dwie tygodniowe analogowe symulacje misji.



Rysunek 5.80: Habitat SAM i hala do symulacji EVA, źródło: [206]

Determinanty w kształtowaniu formy analogowych habitatów kosmicznych

nazwa: SAM

<i>rok powstania</i>	<i>inwestor</i>	<i>projektant</i>
2023	Arizona State University	Kai Staats
<i>lokalizacja:</i>	<i>środowisko:</i>	<i>funkcja środowiska:</i>
Arizona, USA	ekstremalne: izolacja	kontrola, izolacja

Cechy technologiczne:

<i>typ architektury:</i>	<i>system konstrukcyjny:</i>	<i>wyzwania środowiskowe:</i>
Planetarna		Systemy podtrzymywania życia, Zagrożenia środowiskowe, wyzwania behawioralne, spacery kosmiczne , Inżynieria systemów
<i>typ konstrukcji:</i>	<i>HRL:</i>	<i>TRL dla symulatorów:</i>
spin-in	5	5
<i>jakość wykonania:</i>	<i>użyte materiały:</i>	<i>poziom wierności:</i>
umiarkowana		MF

Cechy operacyjne:

<i>liczność załogi:</i>	<i>liczba misji:</i>	<i>dni misji: średnio/maks.</i>
0	2	7/ 7
<i>status aktywności:</i>	<i>intensywność aktywności:</i>	<i>poziom wierności:</i>
placówka w użyciu od 2023	sporadyczne testy	MF
<i>działania analogowe:</i>		<i>działania poza analogowe:</i>
analogowe symulacje misji/testy analogowe / zarządzanie misją / prowadzenie badań / zbieranie danych w trybie ciągłym		edukacja i popularyzacja nauki/trening ludzki

Cechy naukowe:

<i>dyscyplina i obszar działalności:</i> nauki planetarne/ psychologia i socjologia/ IT i telemetria/ systemy podtrzymania życia/ produkcja żywności/		
<i>liczba publikacji:</i>	<i>jakość publikacji:</i>	<i>poziom wierności:</i>
niska	umiarkowana	MF

Forma:

<i>typ logistyczny:</i>	<i>formy geometryczne:</i>	<i>układ:</i>
monolityczny	graniastosłup	centralny
<i>forma przestrzenna:</i>	<i>infrastruktura:</i>	<i>teren:</i>
wielościanny		hala EVA

Tabela 5.50: Dane dotyczące habitatu SAM

nazwa: SAM

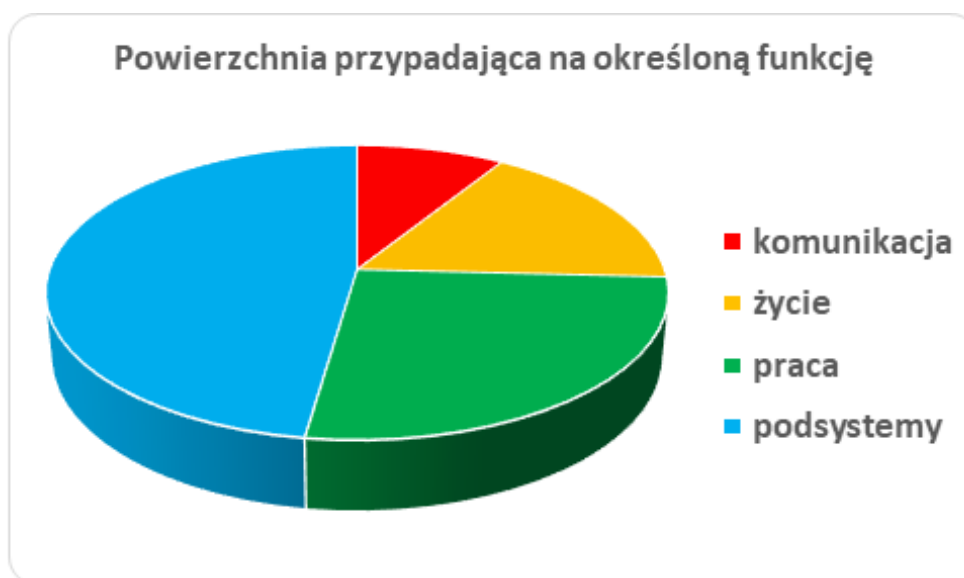
typ: Habitat

ilość misji	A[m ²]	V[m ³]	załoga	m ² /os	m ³ /os
0	148	572	4	37	143

	L[m]	W[m]	H[m]	A[m ²]	V[m ³]
Część Mieszkalna			2.6	30	78
<i>Kuchnia</i>			2.6	10	26
<i>Łazienka</i>			2.6	5	13
<i>Pokoje załogi</i>			2.6	10	26
<i>komunikacja</i>			2.6	5	13
Śluza			2.6	8.2	21.32
Warsztat			2.6	24	62.4
Magazyn 2			2.6	7.8	20.28
Szklarnia z laborato- rium			5	78	390

Typ funkcji	A[m ²]	A/os.[m ²]
komunikacja	13.2	3.3
życie	25	6.25
praca	39.2	9.8
podsystemy	70.6	17.65
suma	148	37

Tabela 5.51: Dane dotyczące habitatu SAM, dalsza część tabeli



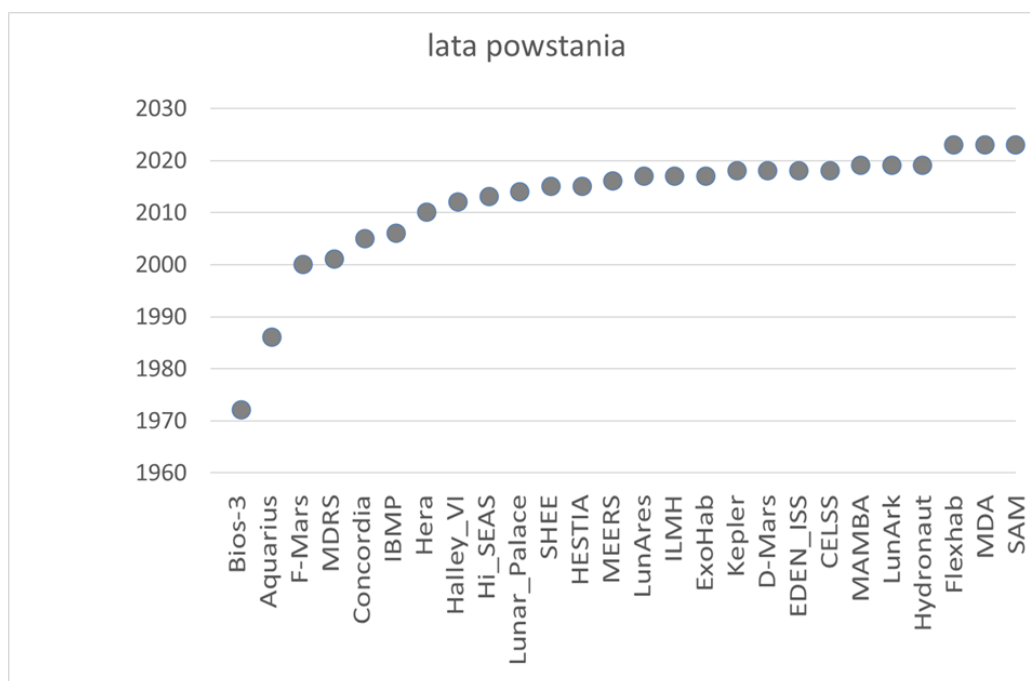
Rysunek 5.81: Ilustracja graficzna powierzchni przypadającej na określone funkcje habitatu SAM.

6 Synteza i interpretacja wyników

Przegląd obiektów z poprzedniego rozdziału dostarczył wielu danych pozwalających na przeprowadzenie analizy porównawczej wybranych charakterystyk analogowych habitatów kosmicznych (AHK). Porównanie informacji o lokalizacji, środowisku, cechach technologicznych, naukowych oraz operacyjnych zakończone analizami funkcji oraz układu przestrzennego ma na celu uporządkowanie wiedzy na temat AHK oraz wyciągnięcie wniosków dotyczących determinant w ich kształtowaniu. Podjęta też będzie próba stworzenia podstawowej typologii AHK na podstawie przeprowadzonych analiz.

6.1 Analiza porównawcza wybranych analogowych habitatów kosmicznych

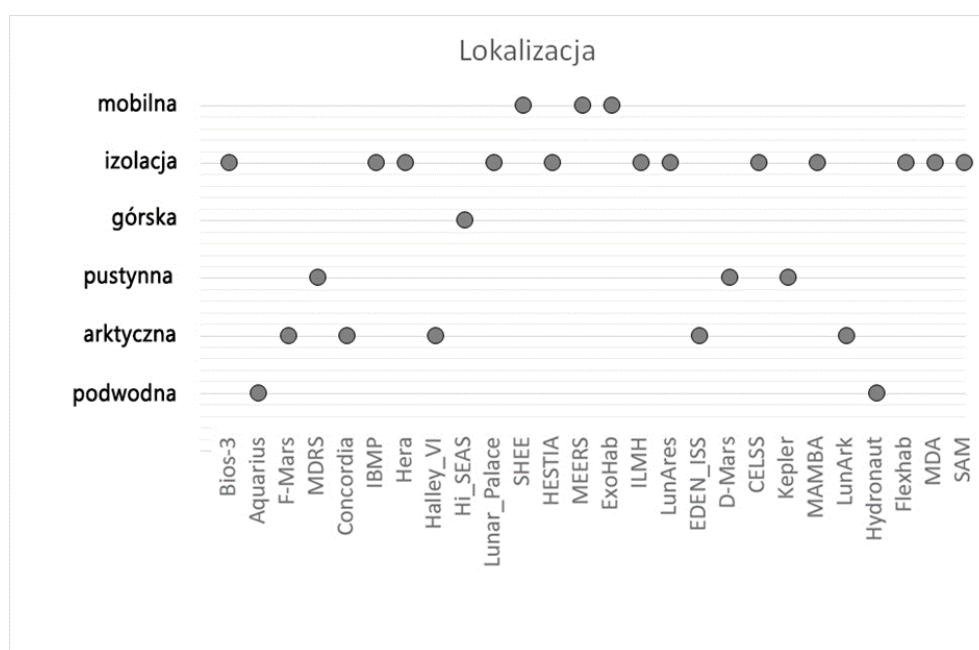
6.1.1 Lata powstawania analogowych habitatów kosmicznych



Rysunek 6.1: Lata powstania AHK (opracowanie własne).

Badanie historii analogowych habitatów kosmicznych daje pełniejsze zrozumienie ewolucji tych struktur (Rys.6.1). W latach 1970–2000 powstało relatywnie mało takich habitatów, powstało jednak kilka znaczących projektów. Sowiecki Bios-3, eksperyment zamkniętego środowiska, oraz habitat Aquarius, stworzony do badań oceanicznych, to pionierskie kroki w tym obszarze. Należy również podkreślić rolę placówki Biosphere-2, której obecnie patronuje Arizona State University, mimo że nie została uwzględniona w powyższym zestawieniu. Początek nowego wieku, lata 2000–2010, to okres, kiedy powstały pierwsze dedykowane analogowe habitaty kosmiczne. Dwa z nich, F-Mars i MDRS, zostały stworzone przez pozarządową organizację *The Mars Society*. W tym samym czasie powstały również habitaty analogowe NASA i ROSKOSMOSu – Hera oraz IBMP. Nowo powstałe stacje arktyczne, Concordia oraz Halley VI, zaczęły być wykorzystywane do badań analogowych, choć w ograniczonym stopniu. Okres 2010–2020 to czas, kiedy obserwujemy znaczny przyrost liczby analogowych habitatów kosmicznych. Początek dekady to narodziny pierwszych habitatów związanych z uniwersytetami i instytucjami naukowymi w USA (Hi_Seas, Meers i ILMH), ale też projektów z Europy (SHEE, LunAres, ExoHab, EDEN_ISS, MAMBA, LunArk, Hydronaut), Chin (Lunar_Palace, CELSS) oraz Bliskiego Wschodu (D-Mars, Kepler). Pokazuje to nowość zjawiska, jakim są analogowe habitaty kosmiczne. Obecna dekada przynosi coraz bardziej skomplikowane projekty. Europejska Agencja Kosmiczna rozwija projekt Luna (Flexhab), NASA tworzy Mars Dune Alpha (MDA), a Arizona State University prowadzi prace nad SAM. Te zaawansowane inicjatywy wskazują na dużą wagę przypisywaną projektom analogowych habitatów kosmicznych i dają obiecujące perspektywy na przyszłość.

6.1.2 Lokalizacja analogowych habitatów kosmicznych



Rysunek 6.2: Lokalizacja AHK (opracowanie własne).

Lokalizacja i środowisko, w którym AHK są umieszczone, mają znaczący wpływ na możliwości operacyjne oraz prowadzone badania naukowe (Rys. 6.2)¹. W związku z tym, różne środowiska naturalne służą jako różne analogi dla załogowych misji kosmicznych. Obecnie, dwa aktywne analogowe habitaty znajdują się w środowisku podwodnym. Te unikatowe struktury oferują niepowtarzalne możliwości badań nad izolacją oraz spacerami kosmicznymi, szczególnie przy zastosowaniu zestawów do nurkowania o odpowiedniej wyporności. Koszty utrzymania tych habitatów, jak również ograniczona przydatność do badań środowiska wodnego, mogą tłumaczyć ich małą liczbę. Warto zaznaczyć, że pełne analogowe symulacje misji pod wodą są realizowane stosunkowo rzadko, a testy analogowe są przeprowadzane głównie w basenach treningowych NASA i ESA.

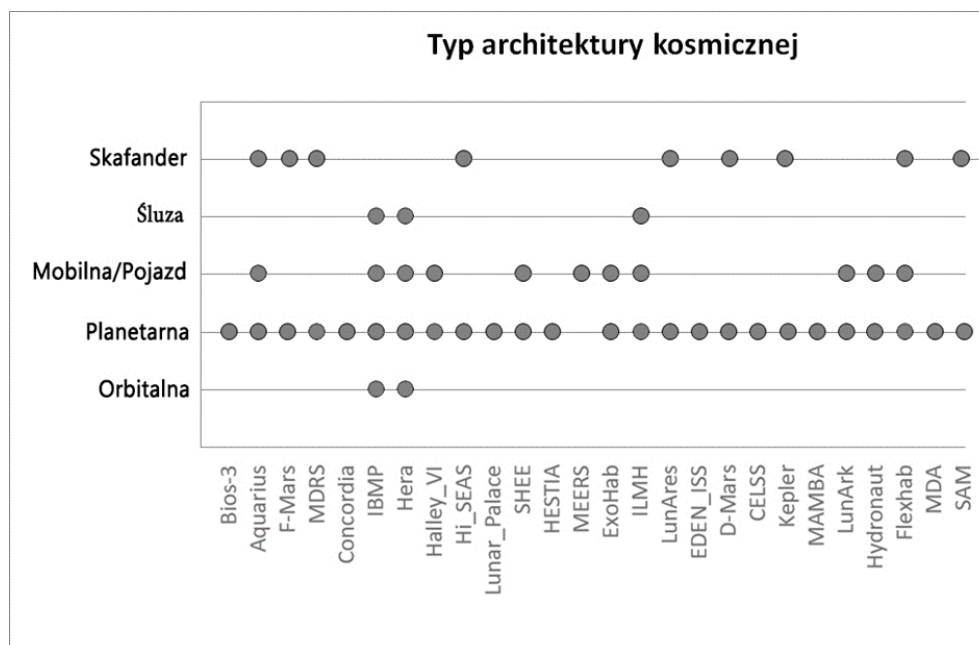
W środowisku arktycznym znajduje się pięć placówek zajmujących się badaniami analogowymi. Habitat F-Mars jest najłatwiejszy do zasiedlenia ze względu na swoje położenie na północy Kanady, a pierwsza od lat rewitalizacja placówki planowana jest na jesień 2023 roku. Placówki Concordia, Halley VI oraz EDEN_ISS, zlokalizowane na Antarktydzie, prowadzą badania przy okazji misji polarnych. EDEN_ISS, który prowadził głównie badania nad uprawą żywności, został w 2022 roku przetransportowany do Niemiec, gdzie czeka na integrację z projektem Luna (Flexhab). LunArk, po jednorazowym zastosowaniu, jest obecnie wystawiony w muzeum w Danii.

W środowisku pustynnym znajdują się trzy AHK, z których dwa są nadal aktywne. MDRS cieszy się dużym zainteresowaniem niezależnych zespołów naukowych, choć ze względu na swoje położenie jest również często odwiedzany przez turystów, co może zakłócać symulacje. D-Mars w Izraelu obecnie przechodzi etap zmiany lokalizacji i jest przenoszony z pustyni Negew na miejsce bardziej dostępne. Jedyne habitat znajdujący się w środowisku górskim, HI_SEAS, zlokalizowany jest na Hawajach. Znajduje się on na zboczu wulkanu tarczowego i ma dostęp do licznych tuneli lawowych będących analogiem dla podobnych środowisk na Księżycu i Marsie.

Najliczniejszą grupę stanowią habitaty izolacyjne, które w różnym stopniu umożliwiają powtarzalność oraz dokładność izolacji. Analiza lat powstania habitatów w poszczególnych lokalizacjach pokazuje rosnący nacisk na placówki izolacyjne, które umożliwiają kontrolowanie warunków badań. Wśród placówek mobilnych jedynym pełnowartościowym projektem jest SHEE, który obecnie znajduje się w Stuttgarcie. Jest planowane podjęcie nowych działań badawczych z użyciem tego habitatu. Inne przykłady, takie jak MEERS czy ExoHab, zawdzięczają swoją mobilność budowie opartej na komercyjnych wozach kempingowych. Warto wspomnieć, że niektóre z niemobilnych habitatów również były relokowane (np. HERA, EDEN-ISS). Placówki funkcjonujące w analogowych lokalizacjach stanowią niewielki odsetek działających obiektów, co może sugerować brak większego zapotrzebowania na analogi środowiskowe oraz trudności związane z prowadzeniem i utrzymaniem ich infrastruktury.

¹Prezentowane w tej pracy zestawienia będą przedstawiały AHK w chronologicznej kolejności ich powstawania, w celu przejrzystości prezentowanych danych.

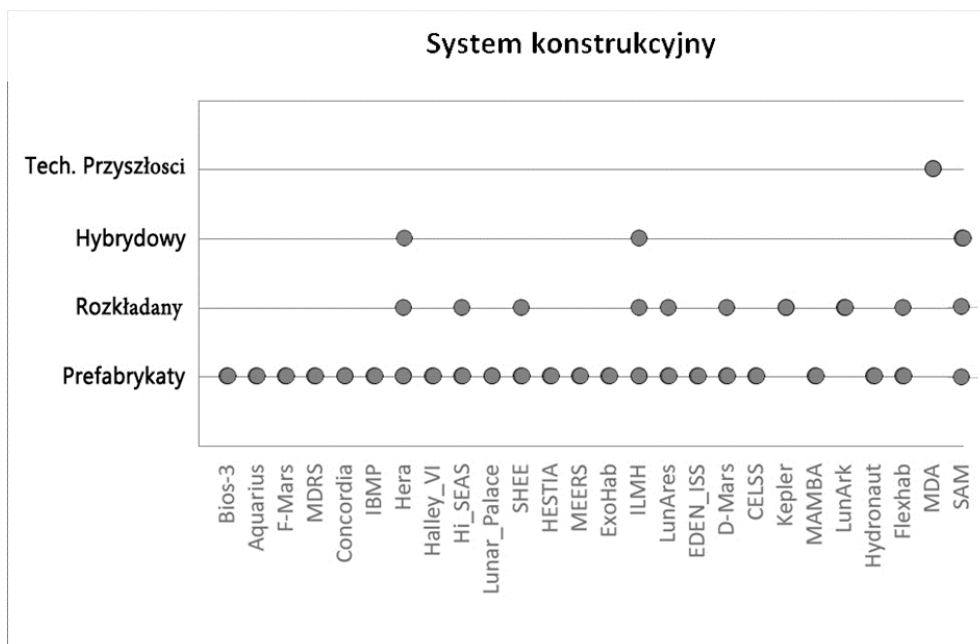
6.1.3 Typ architektury kosmicznej analogowych habitatów kosmicznych



Rysunek 6.3: Typy architektury kosmicznej AHK (opracowanie własne).

Analizując AHK pod kątem typów architektury kosmicznej, praktycznie wszystkie można zaliczyć do kategorii architektury planetarnej (Rys. 6.3). Wynika to z faktu, że powstały one w ziemskim środowisku i na Ziemi prowadzone są badania dotyczące misji planetarnych. Do architektury orbitalnej można zaliczyć tylko dwie placówki: IBMP i Hera. Obydwie prowadziły analogowe symulacje misji, które zakładały podróż na Księżyc lub Marsa. Warto zauważyć, że przynależność do architektury orbitalnej wynika z zakresu prowadzonych badań, a nie z rzeczywistego położenia tych placówek. Placówki zaliczane do architektury mobilnej lub pojazdów używane były w tym celu ze względu na swoje rozmiary i nie mają one koniecznego związku z rzeczywistą możliwością ich przemieszczania. Takie klasyfikacje są często używane dla celów analitycznych i nie zawsze dokładnie odzwierciedlają stan rzeczywisty. Niektóre z AHK pozwalają na badania nad projektami śluz do habitatów kosmicznych i prowadzą odrębne projekty badawcze. Jest to ważne z punktu widzenia przyszłych misji kosmicznych, które mogą wymagać takich struktur. Na koniec warto zauważyć, że AHK, które posiadają analogowe skafandry kosmiczne i prowadzą symulacje spacerów kosmicznych, zostały zaliczone do kategorii testujących skafandry kosmiczne. Ta kategoria jest niezwykle istotna dla bezpośredniego przygotowania astronautów do przyszłych misji załogowych.

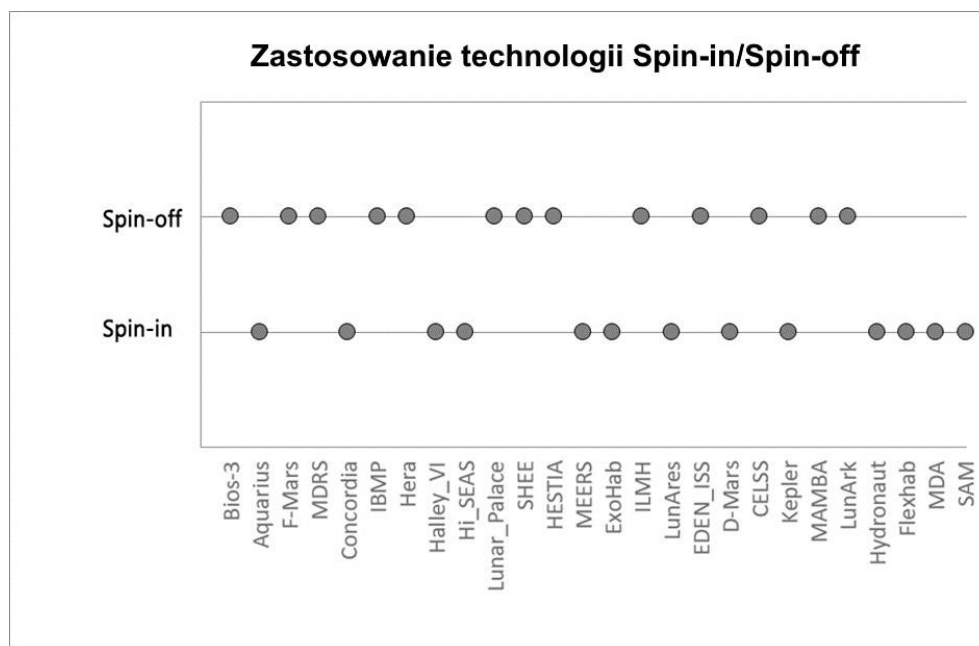
6.1.4 Systemy konstrukcyjne analogowych habitatów kosmicznych



Rysunek 6.4: Systemy konstrukcyjne AHK (opracowanie własne).

Analiza rodzajów systemu konstrukcyjnego AHK ujawnia, że systemem konstrukcyjnym najczęściej spotykanym w przypadku AHK są prefabrykaty (Rys. 6.4). Zbiega się to z obecnymi trendami projektowania stacji kosmicznych, które coraz częściej opierają się na konstrukcjach modułowych dostarczanych na niską orbitę Ziemi. Modularność oferuje wiele korzyści, takich jak elastyczność w konfiguracji, łatwość rozbudowy i wymiany komponentów, a także możliwość przeprowadzania misji w różnych konfiguracjach zależnie od celów badawczych. Niektóre z tych habitatów, takie jak Hera, Hi_Seas, ILMH oraz LunAres, posiadają dodatkowo elementy rozkładane w postaci kopuł lub modułów nadmuchiwanymi. Ta cecha pozwala na zwiększenie objętości dostępnej przestrzeni życiowej i badawczej, podczas gdy sama struktura pozostaje kompaktowa podczas transportu. Inne AHK, jak SHEE, D-Mars oraz LunArk, są konstrukcjami sztywnymi z rozkładanymi elementami zwiększającymi ich objętość. Habitat Kepler był konstrukcją w pełni nadmuchiwaną, co daje potencjalne korzyści w zakresie masy i objętości transportowej, choć może to również stwarzać wyzwanie w zakresie trwałości i odporności na warunki zewnętrzne. Jednym z najbardziej nowatorskich podejść do budowy habitatów jest Mars Dune Alpha (MDA), który reprezentuje technologie przyszłości. Habitat ten został wydrukowany za pomocą wielkoskalowego druku 3D z betonu. Otwiera to nowe możliwości dla budowy infrastruktury kosmicznej, zarówno na Ziemi, jak i na innych planetach.

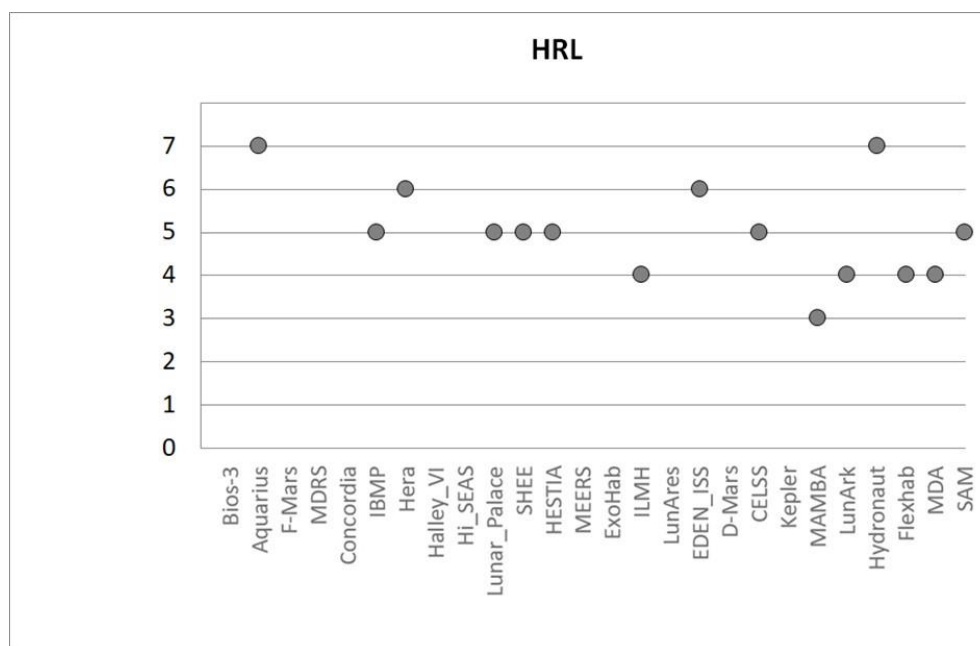
6.1.5 Zastosowanie technologii Spin-in/ Spin-off w analogowych habitatach kosmicznych



Rysunek 6.5: Zastosowanie technologii Spin-in/ Spin-off AHK (opracowanie własne).

Typy konstrukcji AHK można także sklasyfikować pod kątem wykorzystania technologii spin-in, które pochodzą z innych sektorów przemysłu, oraz technologii spin-off, które zostały stworzone specjalnie dla projektów kosmicznych (Rys. 6.5). Placówki takie jak Aquarius, Concordia, Halley_VI, Hydronaut oraz SAM są przykładami placówek spin-in. Początkowo nie były one stworzone z myślą o badaniach nad załogowymi lotami kosmicznymi, ale ich unikatowe cechy dają dodatkowe możliwości badawcze. Również placówki takie jak HI_SEAS, MEERS, ExoHab, LunAres, D-Mars, Kepler, Flexhab oraz MDA wykorzystują komercyjne rozwiązania konstrukcyjne, takie jak namioty geodezyjne czy kontenery morskie i są zaliczane do placówek spin-in. Flexhab i MDA stanowią szczególny przypadek, ponieważ mogłyby być także zaliczone do placówek spin-off (określenie „spin-off” odnosi się do technologii stworzonych na potrzeby przemysłu kosmicznego, które potem zostały zaadaptowane przez przemysł codzienny). W projekcie Flexhab rozważana jest możliwość budowy konstrukcji od podstaw, podobnie jak to miało miejsce w przypadku EDEN_ISS. MDA został wydrukowany za pomocą komercyjnych drukarek do betonu firmy ICON, a jego forma była zoptymalizowana specjalnie dla tego projektu. Ze względu na nowość tych projektów, zdecydowano jednak o ich pozostawieniu w kategorii spin-in. Placówki spin-off, dla których konstrukcje były projektowane od podstaw na potrzeby projektów, to m.in.: Bios-3, F-Mars, MDRS, IBMP, Hera, Lunar_Palace, SHEE, ILMH, EDEN_ISS, CELSS, MAMBA oraz LunArk. Niezależnie od tego, czy są to habitaty spin-in czy spin-off, różnią się w ramach każdej grupy jakością użytych materiałów oraz zastosowanych rozwiązań konstrukcyjnych, co pokazuje szeroki zakres podejść do projektowania AHK.

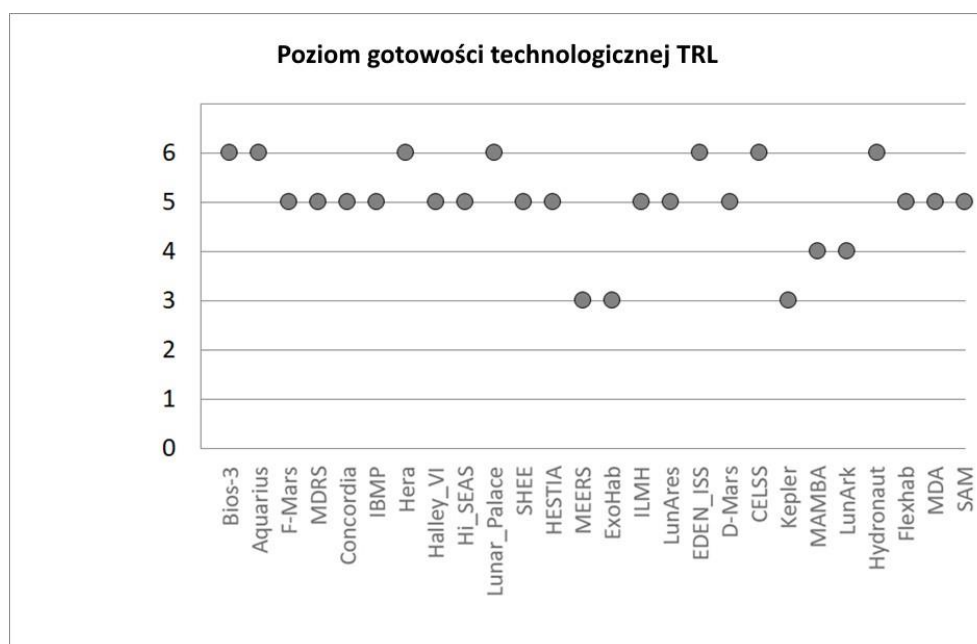
6.1.6 Poziom gotowości do zamieszkania (HRL) analogowych habitatów kosmicznych



Rysunek 6.6: Poziom gotowości do zamieszkania AHK (opracowanie własne).

Poziom gotowości do zamieszkania (Habitation Readiness Level, HRL) to skala używana do oceny stanu rozwoju technologii w kontekście zastosowań kosmicznych (Rys. 6.6). Jest wykorzystywana tylko dla habitatów stworzonych z myślą o testowaniu rozwiązań inżynieryjnych lub pełnoprawnych habitatów podwodnych. Na najniższym poziomie HRL 3 znajduje się MAMBA, która jest drewnianą makietą w skali 1:1. Jest wykorzystywana do testowania ergonomii oraz inżynierii systemów. Habitaty z HRL 4 to te, których konstrukcja została stworzona z docelowych materiałów, ale nie posiadają rozbudowanych systemów inżynieryjnych. Są to prototypy strukturalne, służące do testowania różnych rozwiązań przestrzennych. Habitaty z HRL 5 są zaawansowanymi obiektami, posiadającymi konstrukcje i podsystemy umieszczone w kontrolowanym środowisku, często zdolnym utrzymać ciśnienie różniące się od zewnętrznego. Ich systemy podtrzymywania życia są sprzężone z laboratorium, w którym się znajdują. Habitaty z HRL 6 to te, które posiadają dedykowaną strukturę wraz z inżynierią systemów i były testowane w ekstremalnych warunkach. Przykładami takich obiektów są Hera oraz EDEN_ISS. Na poziomie HRL 7 znajdują się działające habitaty podwodne. Są one pełnoprawnymi ekstremalnymi habitatami, ale nie osiągają poziomu HRL 9, ponieważ ten poziom dotyczy habitatów używanych w przestrzeni kosmicznej. Pozostałe analogowe habitaty kosmiczne nie posiadają określonego poziomu HRL, ale dla nich określono poziom Technological Readiness Level (TRL) dla symulatorów, który ocenia gotowość technologiczną danej placówki do prowadzenia testów.

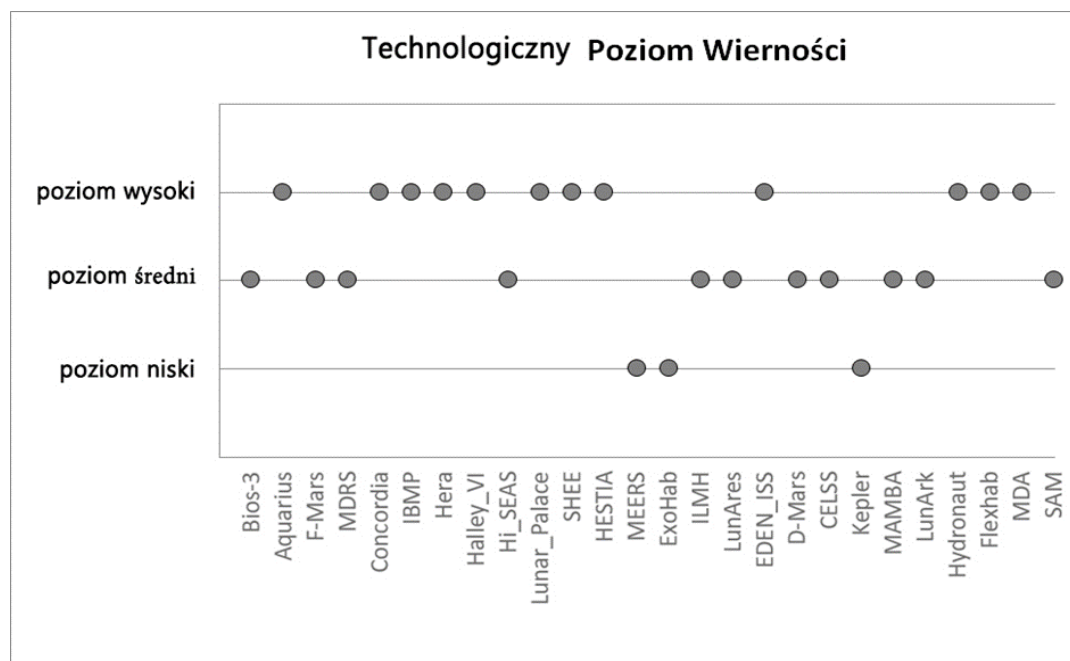
6.1.7 Poziom gotowości technologicznej analogowych habitatów kosmicznych



Rysunek 6.7: Poziom gotowości technologicznej TRL analogowych habitatów badawczych (opracowanie własne).

Poziom Gotowości Technologicznej dla Symulatorów (Technology Readiness Level for Simulators, TRL) to skala oceny gotowości technologicznej symulatorów dla różnych obiektów (Rys. 6.7) (por. tabela 4.28). Obiekty o najniższym TRL (3) to te stworzone na podstawie wozów kempingowych, które prezentują niskie walory operacyjne. Podobny poziom otrzymała stacja Kepler, która jako nadmuchiwany namiot służyła jedynie jako scenografia do Austriackiego Forum Kosmicznego. Poziom 4 został przyznany dwóm habitatom: MAMBA oraz LunArk. Wynikało to z użycia drewna jako materiału budowlanego i prototypowego charakteru tych konstrukcji. Poziom 5 został przyznany czternastu obiektom, które prowadzą analogowe symulacje misji kosmicznych i posiadają cechy symulatora, uwzględniając telemetrię środowiskową i elementy systemów podtrzymywania życia. Habitaty o poziomie 6 to te, które posiadają możliwości pełnego symulatora misji kosmicznej załogowej lub są w pełni funkcjonującymi placówkami badawczymi. Do tej kategorii należą: Bios-3, EDEN_ISS, Lunar_Palace, CELSS, które pozwalają na kompletną izolację i badanie systemów podtrzymywania życia, Hera, który jest pełnym symulatorem habitatu; oraz Aquarius i Hydronaut, które są pełnoprawnymi podwodnymi habitatami.

6.1.8 Technologiczny poziom wierności analogowych habitatów kosmicznych



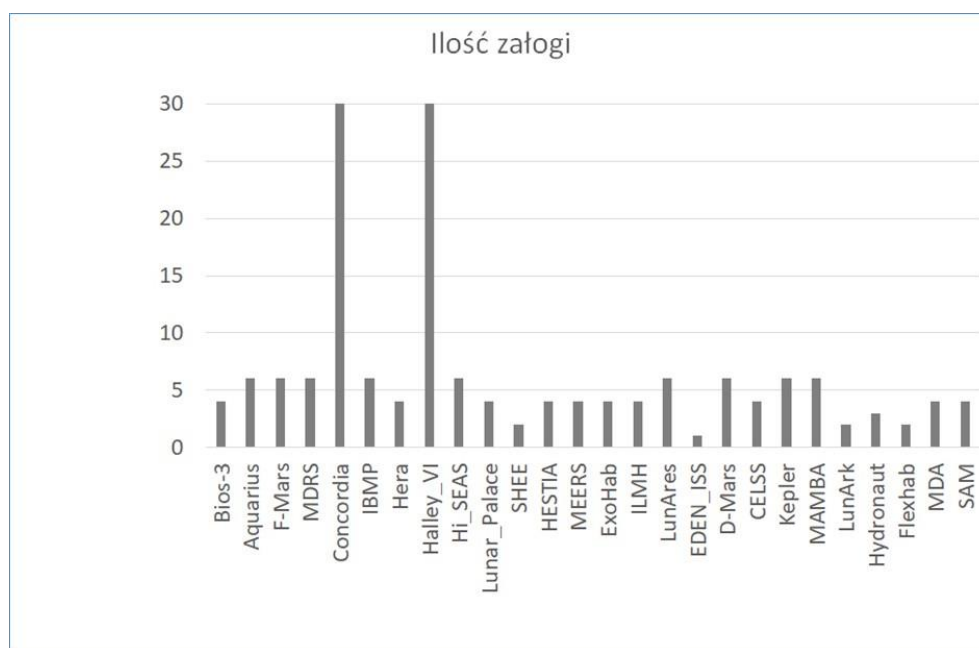
Rysunek 6.8: Technologiczny poziom wierności AHK (opracowanie własne).

Ogólna ocena cech technologicznych według skali tzw. „wierności” (fidelity) określa stopień przystosowania technologii jako analogu docelowych technologii kosmicznych (Rys. 6.8). Na najniższym poziomie wierności znajdują się habitaty, które są prostymi strukturami umożliwiającymi podstawowe testy analogowe. Do tej kategorii należą MEERS, ExoHab oraz Kepler. Średni poziom wierności otrzymały placówki o poziomie Gotowości Technologicznej dla Symulatorów (TRL) 4 oraz 5. Te obiekty pozwalają na przeprowadzanie analogowych symulacji misji. Na najwyższym poziomie wierności znajdują się struktury umieszczone w ekstremalnym środowisku oraz te, które umożliwiają przeprowadzanie długoterminowych badań analogowych. Do tej kategorii zaliczają się habitaty podwodne, habitaty umożliwiające pełną kontrolę środowiska, obiekty skupiające się na produkcji żywności oraz habitaty charakteryzujące się wysoką jakością ich realizacji.

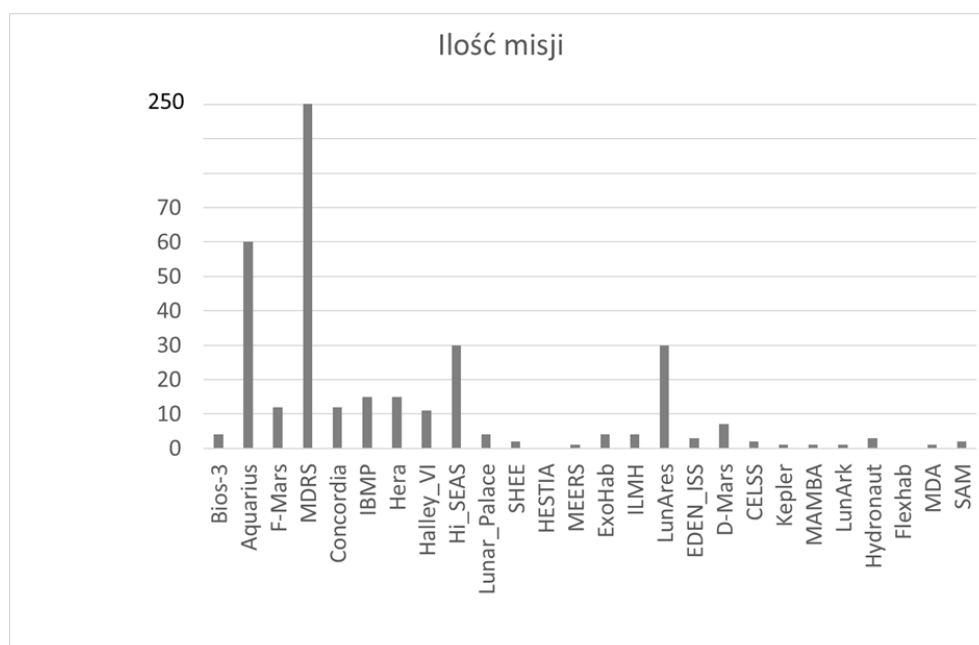
6.1.9 Cechy operacyjne analogowych habitatów kosmicznych

Z pominięciem stacji polarnych, które mają co najmniej 30 członków załogi, liczebność załóg w AHK nie przekracza 6 osób (Rys. 6.9). Jest to związane z charakterystyką misji kosmicznych, które zwykle składają się z niewielkiej liczby osób. Obiekty powstałe do roku 2010 zazwyczaj składają się z sześćoosobowych ekip, z wyjątkiem czteroosobowych Bios-3 i Hera. Do 2017 roku popularnym scenariuszem symulacji stała się misja marsjańska oparta na Mars Reference Mission, co może tłumaczyć sześćoosobowe załogi w tych

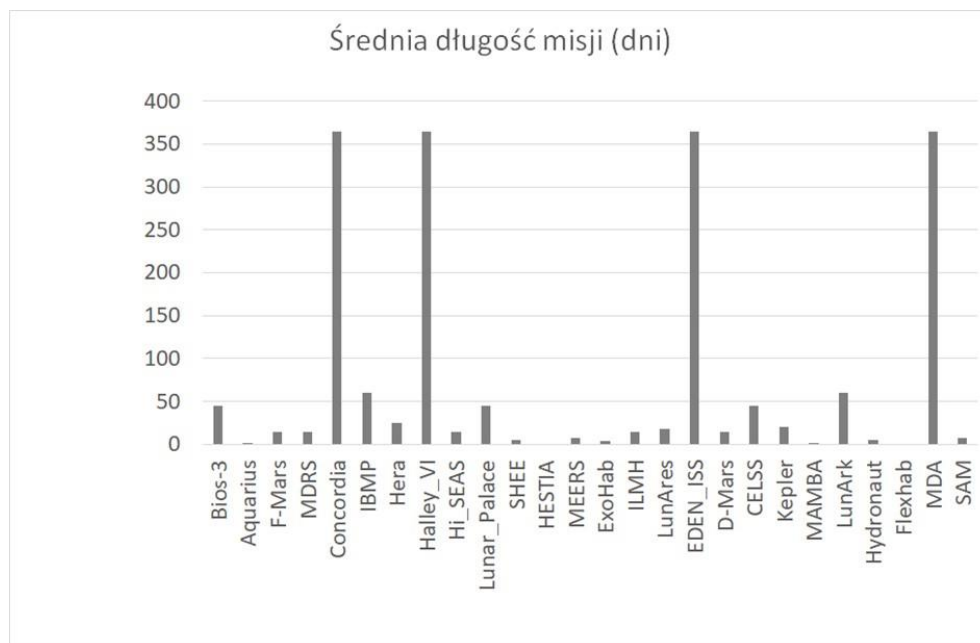
obiektach. Po roku 2018 obserwuje się spadek liczby członków załogi w habitatach. Jest to związane z ogłoszeniem czteroosobowej architektury misji księżycowej w ramach programu Artemis. Habitaty o wyższych stopniach Gotowości do Zamieszkania (Habitation Readiness Level HRL) często mają 4 lub mniej członków załogi. Dotyczy to placówek skupiających się na produkcji żywności, jak i dedykowanych konstrukcji prototypowych. EDEN_ISS oficjalnie działał w ramach dużej stacji arktycznej i pojedynczy członek załogi pełnił rolę opiekuna laboratorium, a nie analogowego astronauty.



Rysunek 6.9: Liczba członków załogi (opracowanie własne).



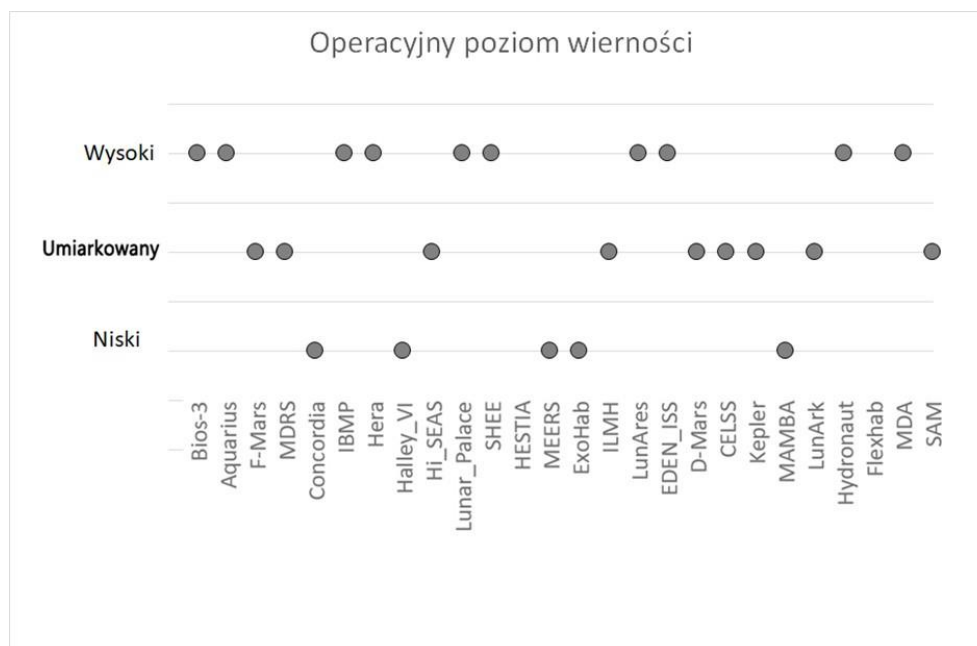
Rysunek 6.10: Liczba misji (opracowanie własne).



Rysunek 6.11: Średnia długość misji (dni), (opracowanie własne).

Liczba misji poszczególnych kompleksów pozwala zaobserwować poziom eksploatacji i aktywność badawczą AHK (Rys. 6.10). Najwięcej badań przeprowadziły Aquarius, działający od lat 80-tych, oraz MDRS, działający na zasadach komercyjnych od 2001 roku. Placówki arktyczne posiadają liczbę misji równą liczbie lat od powstania, gdyż są placówkami całorocznymi. Warto wspomnieć, że IBMP organizował misje o długości 60, 180 oraz 530 dni, a prywatna placówka Hi_SEAS gościła misję analogową NASA o długości 360 dni. Liczba misji nie zawsze przekłada się na poziom eksploatacji obiektu. MDRS posiada największą liczbę analogowych symulacji misji, jako pierwszy komercyjny habitat działający od 22 lat z misjami analogowymi trwającymi średnio 2 tygodnie. Placówkami działającymi w podobnej formule są HI_Seas, LunAres, D-Mars, Hydronaut oraz SAM. W latach 2010–2020 jedynym nowo powstałym analogowym habitatem kosmicznym działającym całorocznie jest EDEN_ISS. LunAres wykazuje największą aktywność badawczą i liczbę symulacji. Od roku 2021 do czerwca 2023, przeprowadzono w nim 24 analogowe symulacje misji. Inne placówki powstałe w tym okresie są mniej aktywne, a możliwymi powodami są operacyjna „młodość” projektów i ich wstępne etapy organizacyjne. Placówki skupiające się na uprawie żywności, takie jak Bios-3, EDEN_ISS, Lunar_Palace i CEELS, cechują się stosunkowo małą liczbą misji, ze względu na znacznie dłuższe okresy trwania analogowych symulacji. Wyjątkiem jest tutaj SAM, w którym, w maju 2023 roku odbyły się pierwsze misje o długości tygodnia, będące misjami testowymi. Jest możliwe, że SAM, mając komercyjny charakter, nie będzie miał okazji zrealizować długoterminowego badania. Najnowszy habitat, MDA, prowadzi właśnie pierwszą misję NASA, będącą misją całoroczną. Nie wiadomo, jakie będą założenia operacyjne dla tej placówki w przyszłości.

6.1.10 Operacyjny poziom wierności analogowych habitatów kosmicznych

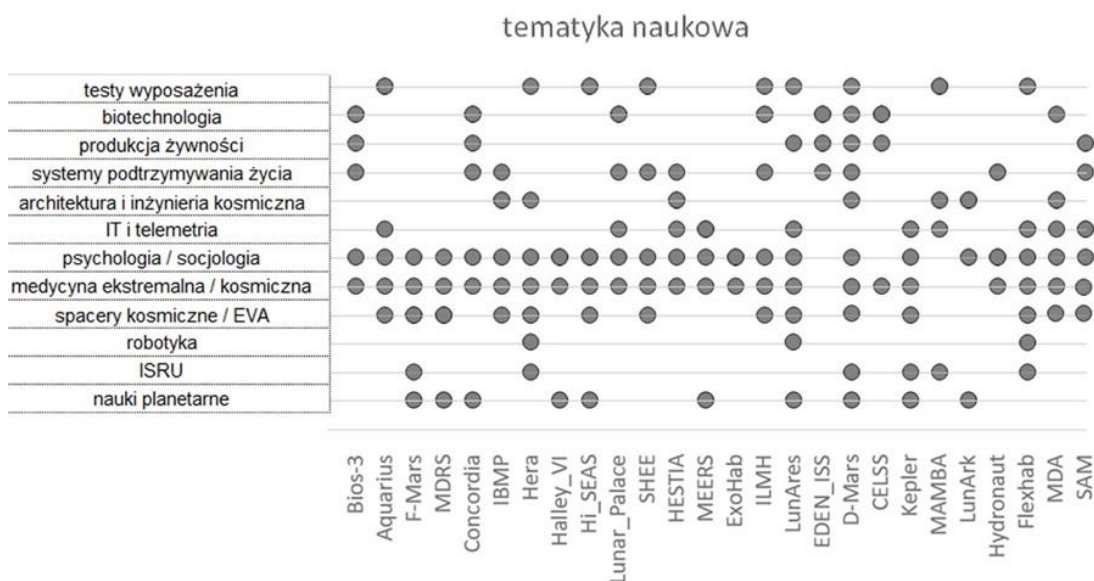


Rysunek 6.12: Operacyjny poziom wierności AHK (opracowanie własne).

Poziom wierności operacyjnej został określony na podstawie potencjału wdrażania różnych scenariuszy badawczych w placówkach, jak i na intensywności ich użytkowania (Rys. 6.12).

Stacje arktyczne, które realizują swoje docelowe cele badawcze, nie są wykorzystywane do pełnych analogowych symulacji misji oraz scenariuszy kosmicznych. Z tego powodu otrzymały one kategorię placówek o niskim stopniu wierności. Kolejne placówki o niskim stopniu wierności to MEERS i ExoHab, które posiadają niejasny status aktywności, oraz MAMBA, będąca makietą do badania ergonomii. Umiarkowany poziom wierności otrzymały habitaty analogowe, operujące w trudnych warunkach pod względem logistyki i lokalizacji, oraz placówki o niskim stopniu eksploatacji. Wysoki poziom wierności operacyjnej otrzymały natomiast habitaty o dużej aktywności, które mogą realizować długie analogowe symulacje misji.

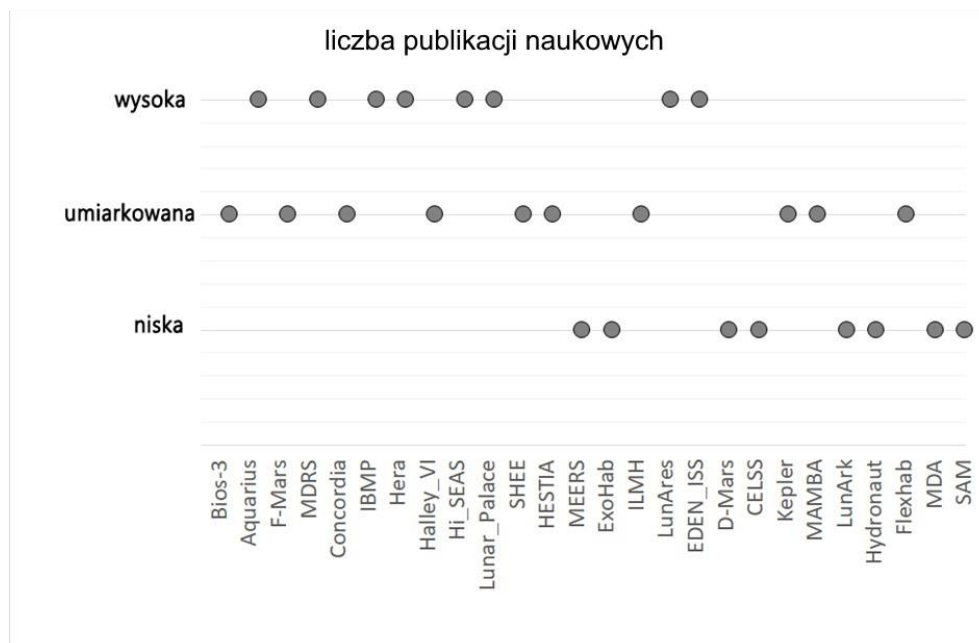
6.1.11 Cechy naukowe analogowych habitatów kosmicznych



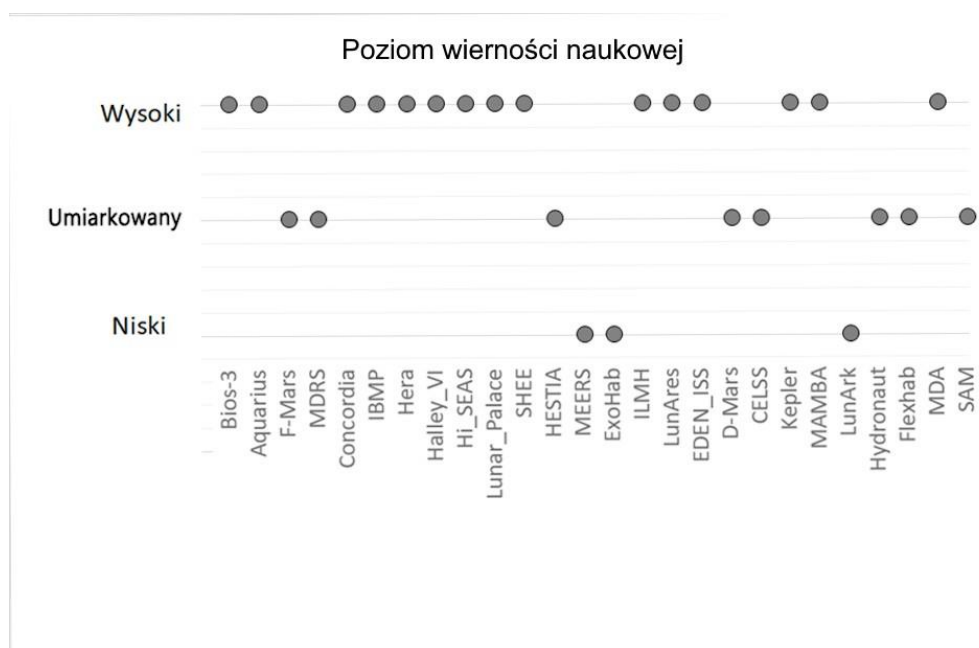
Rysunek 6.13: Cechy naukowe AHK (opracowanie własne).

Analiza tematyki naukowej, która jest realizowana w placówkach, pokazuje duże skupienie na badaniach z udziałem ludzi – medycyna ekstremalna oraz psychologia połączona z socjologią w większości przypadków stanowi ważną część eksperymentów (Rys. 6.13). Badania prowadzone w EDEN_ISS skupione były na technologii produkcji żywności w warunkach arktycznych, natomiast w innych mało zaawansowanych habitatach, jak MEERS i ExoHab, nie prowadzono badań z zakresu medycyny ekstremalnej, nawet jeśli w testach uczestniczyli ludzie. Habitaty, które znajdują się w analogowych środowiskach oraz posiadają odizolowane tereny do symulacji spacerów kosmicznych, często wykorzystują swoje symulacje do testowania procedur oraz sprzętu związanego z naukami planetarnymi, robotyką i wykorzystaniem zasobów kosmicznych (ISRU). Habitaty o wysokim poziomie HRL prowadzą badania z zakresu inżynierii kosmicznej, architektury, telemetrii oraz systemów podtrzymywania życia. Placówki zajmujące się produkcją żywności równocześnie badają systemy podtrzymywania życia oraz tematykę biotechnologiczną. Placówki skupiające się na badaniach czynników ludzkich najczęściej posiadają sześciu członków załogi i skupiają się na dwutygodniowych analogowych symulacjach misji. W ramach ich działalności pojawiają się opracowania związane z zagadnieniami technologicznymi oraz biotechnologicznymi.

Liczba dostępnych prac naukowych w dużej mierze zależy od długości i intensywności eksploatacji placówki (Rys. 6.14). Nowe obiekty posiadają małą liczbę opracowań, a ich jakość zależy od instytucji, które nimi zarządzają i prowadzą w nich badania. W miarę jak placówki „dojrzewają” i zyskują na eksploatacji, liczba i jakość opracowań zwykle wzrasta, co z kolei przyciąga dodatkowe zasoby i możliwości badawcze. Dlatego też, staranność i dedykacja zarządzających placówką są kluczowe dla jej długoterminowego sukcesu w środowisku akademickim.



Rysunek 6.14: Liczba publikacji naukowych AHK (opracowanie własne).

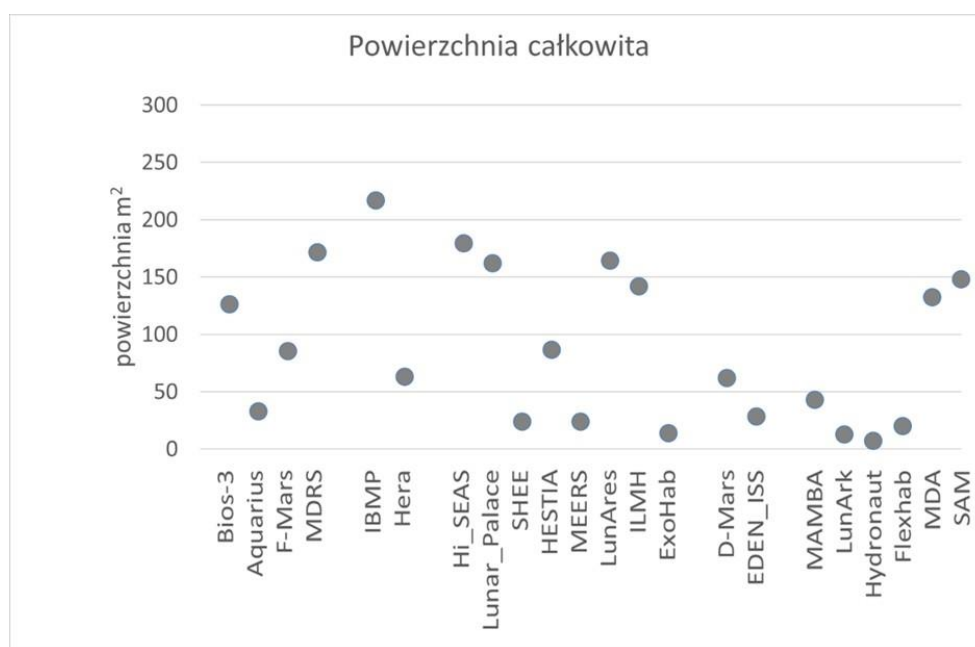


Rysunek 6.15: Poziom wierności naukowej AHK (opracowanie własne).

Poziom wierności jest dla cech naukowych kluczowym elementem, skupiającym uwagę na poziomie prowadzonych badań oraz potencjale do ich kontynuacji lub powtórzenia w przyszłości (Rys. 6.15). W kontekście tych parametrów, można zauważyć zróżnicowanie placówek badawczych. Obiekty o niskim poziomie wierności, takie jak MEERS i ExoHab, od momentu swojego powstania nie były wykorzystywane w jakichkolwiek istotnych badaniach. LunArk, użyty do jednej tylko symulacji przez jego projektantów, dostarczył wartościowych opracowań były one jednak ograniczone do testów technologicznych i terenowych.

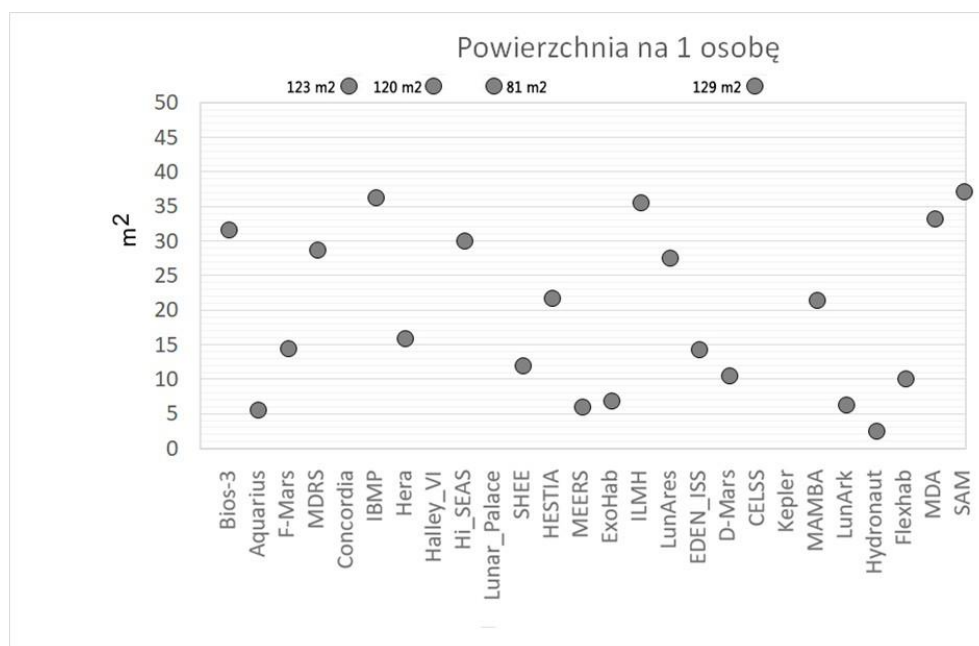
Umiarkowany poziom wierności naukowej można przypisać placówkom, które realizują analogowe symulacje misji, ale tylko z umiarkowaną możliwością powtarzalności badań. W tej kategorii znajdują się również obiekty, które dysponują opracowaniami technologicznymi, ale jeszcze nie przeprowadziły żadnych symulacji, lub te dla których literatura naukowa jest niedostępna. Wysoki poziom wierności naukowej przyznany został placówkom charakteryzującym się dużą liczbą badań oraz wysokim potencjałem do ich powtórzenia. Przykładem są tutaj MAMBA i MDA. Warto jednak podkreślić, że jakość, liczba oraz potencjał do powtarzania badań nie zawsze korelują z zaawansowaniem technologicznym placówki, czy liczbą przeprowadzonych analogowych symulacji.

6.1.12 Forma i funkcja analogowych habitatów kosmicznych



Rysunek 6.16: Powierzchnia całkowita AHK (opracowanie własne).

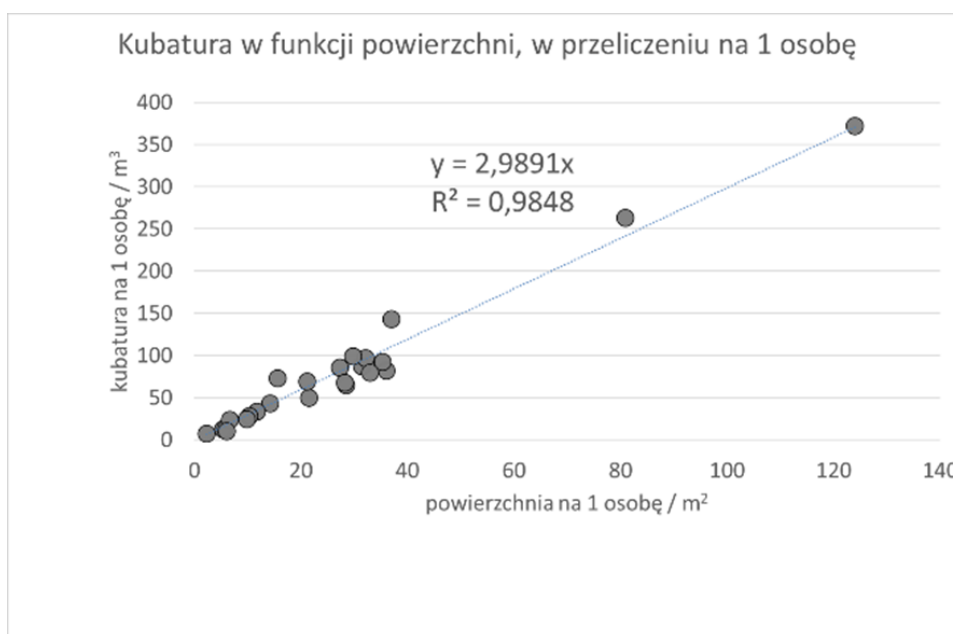
Analizując powierzchnię analogowych habitatów kosmicznych, można zauważyć, że (z pominięciem dużych stacji arktycznych oraz stacji CELSS) przedstawia ona zakres od 7 do 230 m². Niewielką powierzchnię, nierzadko poniżej 10 m², mają najmniejsze z nich, takie jak podwodne habitaty Aquarius czy Hydronaut, oraz te, których konstrukcja opiera się na wozach kempingowych, a także pojedynczy moduł habitatu LunArk. W przypadku habitatów, służących do testowania dedykowanych rozwiązań inżynierskich, ich powierzchnia waha się od 12,3 m² (LunArk) do 83,6 m² (HESTIA). Z kolei powierzchnia na jednego członka załogi mieści się w granicach od 6,1 m² do 21,6 m² (Rys. ??). W tej grupie znajdują się takie obiekty jak Hera, SHEE, HESTIA, MAMBA, LunArk oraz FlexHab, przeznaczone dla załogi nie przekraczającej 4 osób. Szczególnie małe powierzchnie mają te spośród nich, które są przeznaczone do badania pojedynczego aspektu technologicznego i nie posiadają pełnego zakresu funkcjonalnego. Są to LunArk, MAMBA, EDEN_ISS, Flexhab.



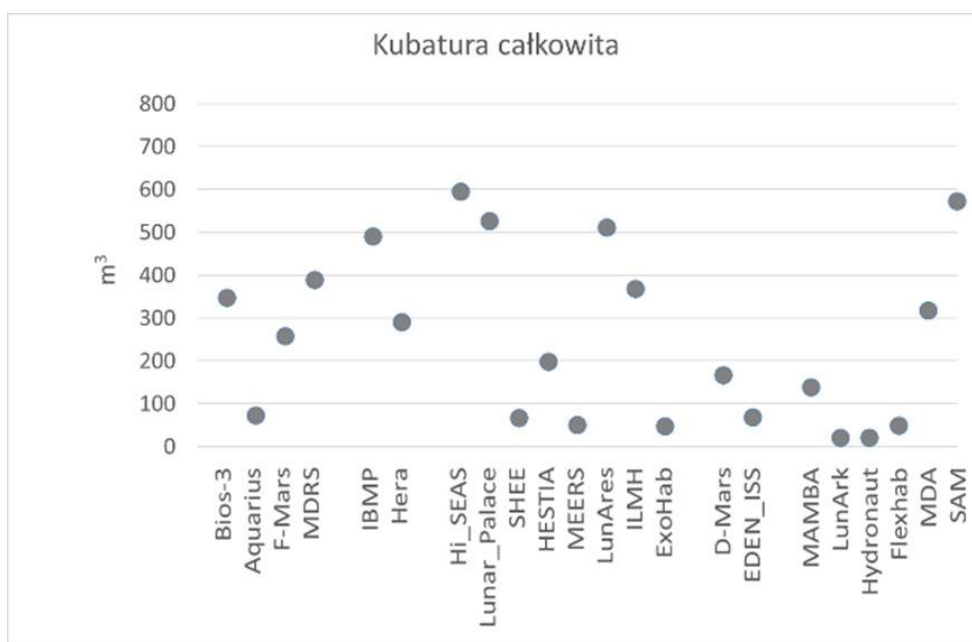
Rysunek 6.17: Powierzchnia na osobę AHK (opracowanie własne).

Habitaty w których prowadzone są badania koncentrujące się na produkcji żywności mają znacznie większe powierzchnie, od 28,3 m² (EDEN_ISS) do 530 m² (CELSS), z powierzchnią przypadającą na jedną osobę od 28,3 m² do 129 m². Tak jak poprzednia kategoria, są one przeznaczone dla niewielkich, 4-osobowych załóg. Wyróżniają się wysokim poziomem HRL oraz wysokim poziomem wierności technologicznej i naukowej. Habitaty przeznaczone do badań czynników ludzkich i dynamiki grupy mają powierzchnię od 62 m² do 171,2 m², a powierzchnia na osobę mieści się w granicach od 10 m² (D-Mars) do 37 m² (MDA). Długoterminowe misje udostępniają powierzchnię użytkową na członka załogi od 27,4 m² do 37 m². Habitaty z tej kategorii są projektowane dla załóg składających się z 4 do 6 osób i charakteryzują się wysokimi poziomami wierności operacyjnej oraz poziomami TRL na poziomie 5 i wyższym. Średnia powierzchnia placówek zaczyna maleć od roku 2018, co prawdopodobnie wiąże się z ogłoszeniem programu księżycowego Artemis oraz zmianą architektury misji księżycowej. Interesującym przypadkiem jest tu habitat MDA (Mars Dune Alpha), zaprojektowany z myślą o marsjańskiej architekturze misji dla 4-osobowej załogi, nie wpisuje się on jednak we wskazany trend zmniejszania powierzchni. Habitaty przeznaczone do badania czynników ludzkich charakteryzują się największym procentowym udziałem funkcji przeznaczonych do życia codziennego, w porównaniu do pozostałych funkcji. Powierzchnie te stanowią od 24% (D-Mars) do 65% całej powierzchni (IBMP). Habitaty takie jak IBMP, MDA, HI_SEAS przeznaczają na funkcje życiowe ponad 52% swojej powierzchni. Wykorzystywane były do analogowych symulacji misji trwających 365 dni i dłużej. Szacuje się, że przestrzeń przeznaczona na pracę w tych habitatach wynosi około 30%, a komunikacja stanowi 5-7% powierzchni użytkowej. Obiekty te mają stosunkowo niewiele miejsca przeznaczonego na podsystemy, głównie ze względu na niski stopień zaawansowania systemów podtrzymywania życia (5-22%).

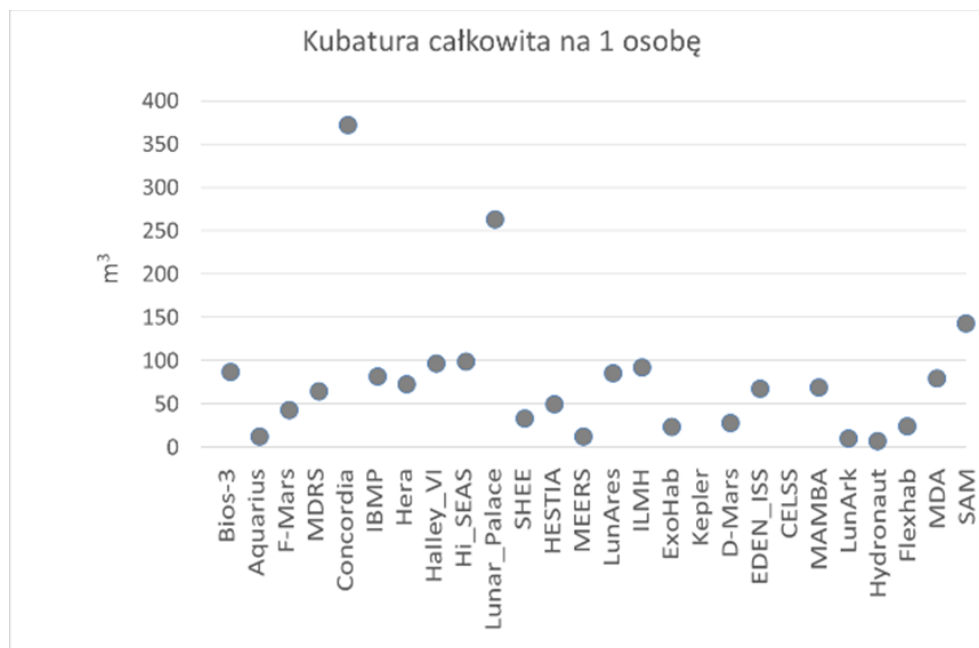
IBMP oraz MDA mają najmniejszy procent przestrzeni przeznaczanej na podsystemy i prawdopodobnie związane jest to z faktem, że media dla tych obiektów są obsługiwane przez budynki, w których zostały zbudowane. Habitaty z konstrukcją typu spin-in charakteryzują się większym procentem powierzchni przeznaczanej na komunikację, co sugeruje mniej efektywne wykorzystanie dostępnej przestrzeni w porównaniu do dedykowanych konstrukcji. W przypadku placówek takich jak Bios-3, Eden_ISS, Lunar_Palace, CELSS oraz SAM, najwięcej miejsca jest przeznaczane na podsystemy, czyli głównie przestrzeń do uprawy żywności.



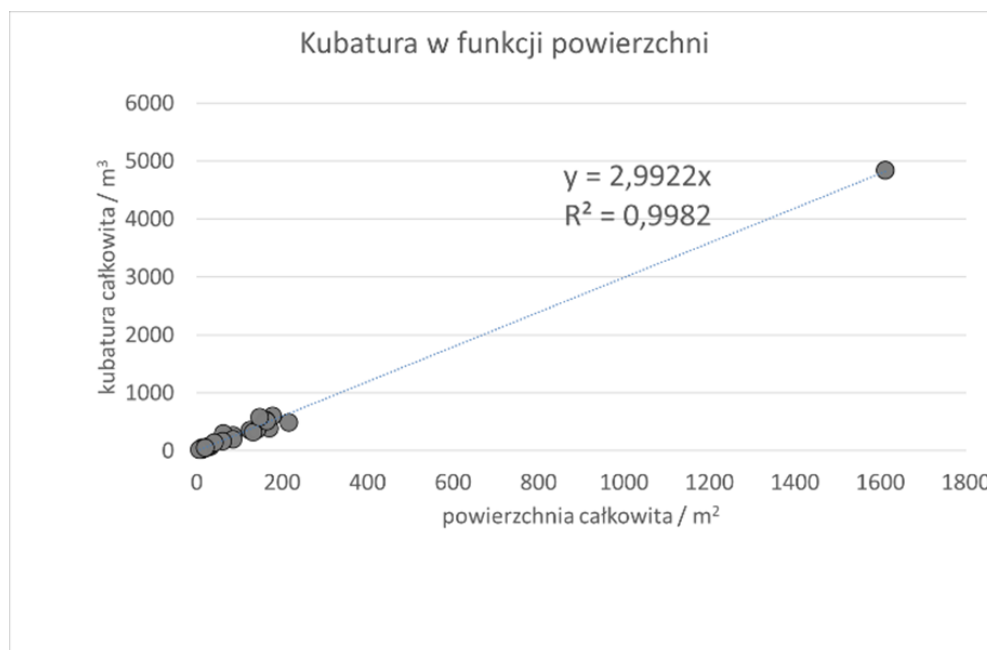
Rysunek 6.18: Kubatura w funkcji powierzchni AHK na 1 osobę (opracowanie własne).



Rysunek 6.19: Kubatura całkowita AHK (opracowanie własne).

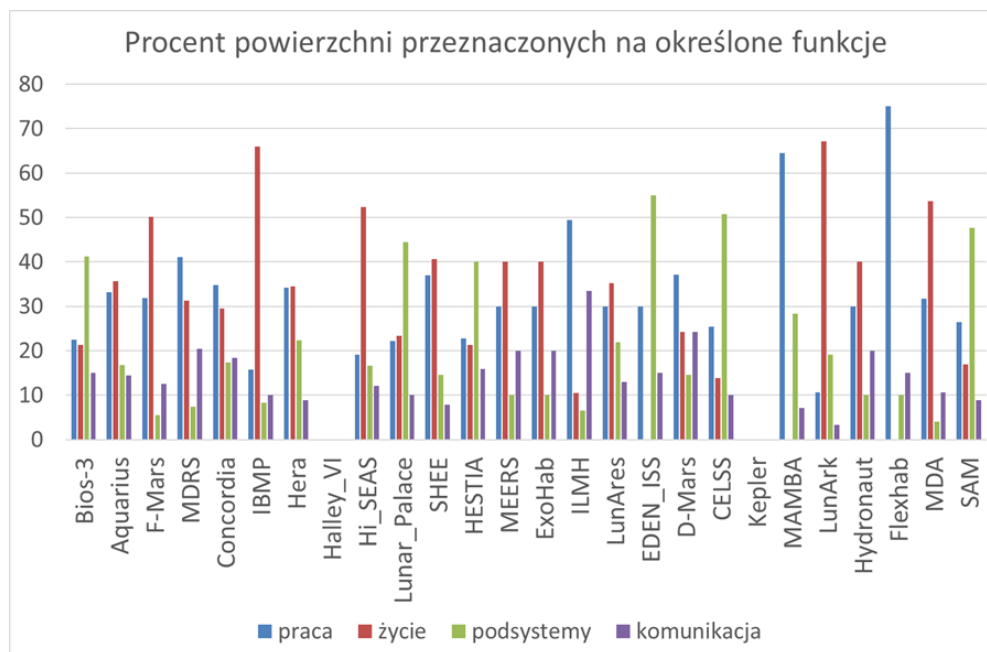


Rysunek 6.20: Kubatura AHK na jedną osobę (opracowanie własne).



Rysunek 6.21: Kubatura AHK w funkcji powierzchni (opracowanie własne).

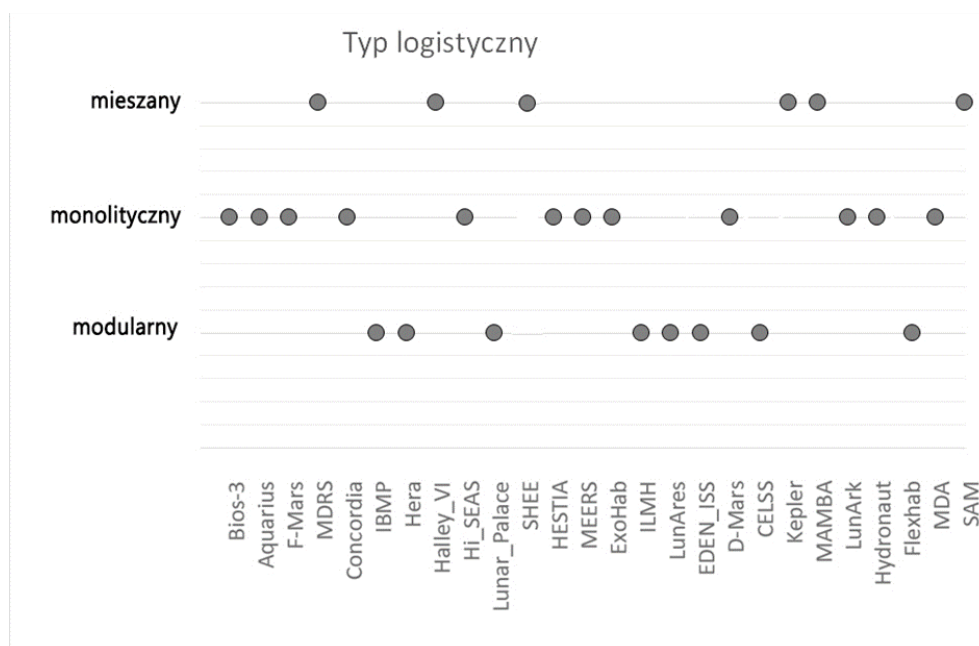
Podsystemy te stanowią 40–55% całej powierzchni habitatu, co jest jednym z powodów wysokiego poziomu HRL tych obiektów. Powierzchnia przeznaczona na funkcje życiowe w tych obiektach waha się od 14 do 23%, z wyjątkiem EDEN_ISS, który jest modulem bez funkcji życiowej. Habitaty przeznaczone do testowania rozwiązań inżynierskich reprezentują zakres procentowy przestrzeni życiowej w granicach 10–40%, z wyjątkiem LunArk, który, jako modulem z jedną główną funkcją życiową, przeznaczona dla niej 68% powierzchni użytkowej.



Rysunek 6.22: Procent powierzchni AHK przeznaczony na określone funkcje (opracowanie własne).

Funkcja pracy w tych obiektach często równa jest albo przewyższa powierzchnię funkcji życiowej, oscylując pomiędzy 32–75% powierzchni. MAMBA i FlexHab, będące modułami testującymi laboratorium, nie przeznaczają przestrzeni na funkcje życiowe. Wyjątkiem jest HESTIA, która najwięcej powierzchni przeznaczona na podsystemy (40%). W jej przypadku podsystemy, będąc głównym celem projektu, można częściowo zaliczyć do funkcji pracy. Obiekty te charakteryzują się małym procentem powierzchni przeznaczony na komunikację, co jest wynikiem efektywnego wykorzystania dostępnej przestrzeni.

Określenie *typ logistyczny* odnosi się do logistyki kosmicznej i określa czy wyniesienie obiektu w przestrzeń kosmiczną wymaga pojedynczego startu rakiety (typ monolityczny) czy wielokrotnych startów (typ modułowy). System mieszany oznacza, że obiekt monolityczny zapewniający podstawowe funkcje może być rozbudowywany o kolejne moduły spełniające dodatkowe funkcje. W analizie różnych typów logistycznych habitatów kosmicznych (Rys. 6.23), typ monolityczny jest najczęściej stosowany. Znamiennej cechą tego typu jest skupienie większości funkcji w ramach jednej formy geometrycznej. Przykłady takich struktur to: HESTIA, emulujący obiekty mieszczące się w pojedynczej owiewce rakiety wynoszącej habitat w kosmos, struktury rozkładane jak SHEE czy LunArk, a także te naśladujące konstrukcje pozaziemskie, takie jak MDA czy Bios-3. Placówki z większą liczbą dodatkowych struktur i modułów zostały zakwalifikowane do kategorii mieszanej. Przykładowo, habitat SHEE, mimo iż oferuje pełny program funkcjonalny, został zaprojektowany z myślą o łączeniu z innymi modułami. Kolejny przykład to MDRS, który mimo głównej, monolitycznej struktury, posiada kilka dodatkowych zabudowań. SAM również wpisuje się w tę kategorię, z racji konstrukcji złożonej z kontenerów morskich oraz większej historycznie struktury modułu prototypowego konstrukcji Biosphere 2.

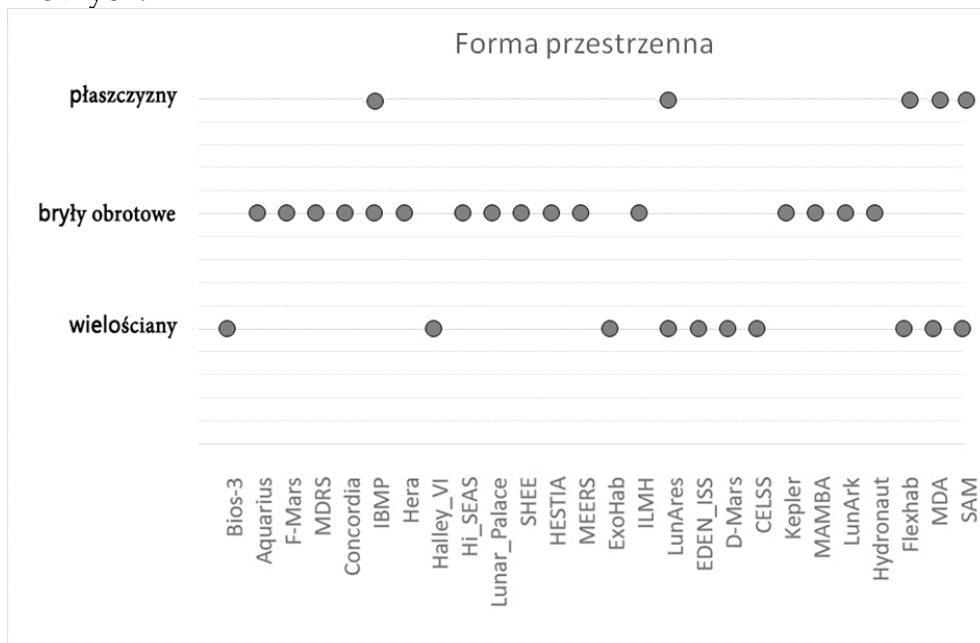


Rysunek 6.23: Typ logistyczny AHK (opracowanie własne).

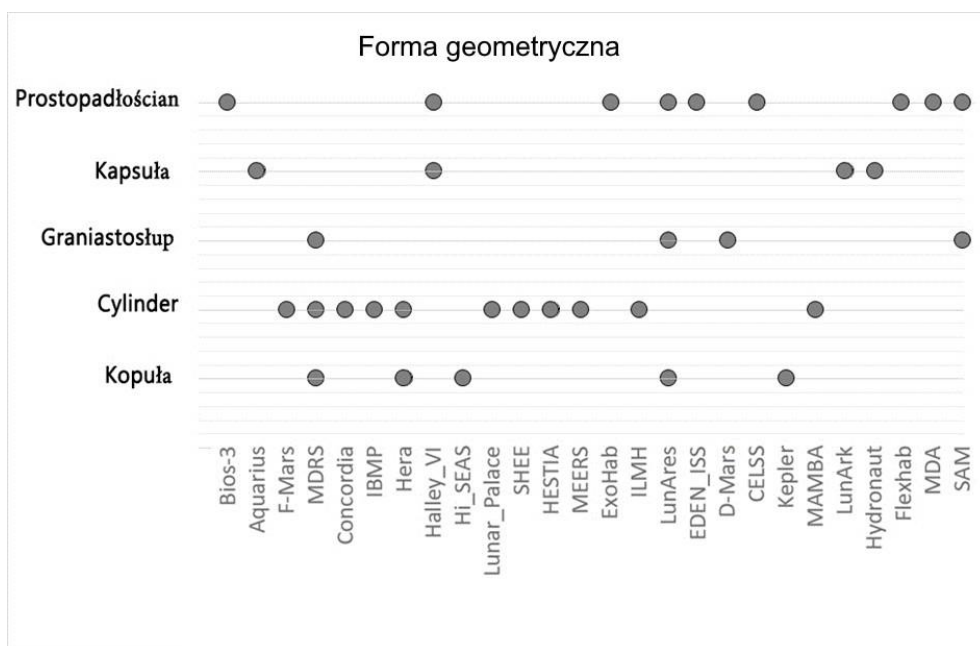
W przypadku habitatów o modularnym typie logistycznym, pełny zakres funkcjonalności osiąga się poprzez użycie wielu modułów. Skutkuje to większymi rozmiarami tych placówek i zwiększoną ilością komunikacji. W przeciwnym przypadku, placówki z pojedynczym modułem oferują ograniczony program funkcjonalny, co przełożyło się na ich mniejsze rozmiary. Ciekawe jest, że oba typy logistyczne, monolityczny i modularny, znajdują zastosowanie w załogowych misjach kosmicznych. Obecne stacje kosmiczne charakteryzują się modularną budową, podczas gdy pojazdy kosmiczne mają budowę monolityczną. Nowe generacje dużych rakiet, posiadające duży tonaż i owiewki o średnicy do 8 metrów, umożliwiają wynoszenie większych obiektów w kosmos lub większe ilości materiałów jednocześnie. Różnorodne podejścia do projektowania i logistyki habitatów kosmicznych pozwalają na efektywne ich wykorzystanie w różnych typach misji i w różnych celach (rys6.24).

Analizując formy przestrzenne AHK, można stwierdzić, że bryły obrotowe dominują jako forma przestrzenna w analogowych habitatach kosmicznych (Rys. 6.24). Wynika to przede wszystkim z ich zgodności z kształtem obecnie istniejących habitatów kosmicznych, które często przyjmują formę zbiorników ciśnieniowych. Wykorzystanie brył obrotowych jest tym uzasadnione, że efektywnie wykorzystują dostępną objętość pod owiewkami rakiet i umożliwiają bardziej równomierne rozmieszczenie masy podczas startu rakiety. Te czynniki przekładają się na optymalizację zarówno pod kątem konstrukcyjnym, jak i operacyjnym. Obiekty, które przyjmują formy wielościenne, zwykle nie koncentrują się na badaniach strukturalnych. Przyglądając się placówkom o wysokim wskaźniku HRL, których badania koncentrują się na uprawie żywności, można zauważyć, że placówki te starają się optymalizować przestrzeń przeznaczoną na uprawy, co prowadzi do wyboru kształtu wielościanu. Ilustruje to, jak formy i funkcje habitatów mogą być dostosowywane do specyficznych celów badawczych. Placówki, które posiadają

formy płaszczyzn, jako uzupełnienie do ich głównej formy, zazwyczaj zawierają dodatkowe hale służące do symulacji spacerów kosmicznych. Ten dodatek podkreśla złożony i wielofunkcyjny charakter obiektów, demonstrując różnorodność podejść do projektowania i wykorzystania analogowych habitatów kosmicznych.

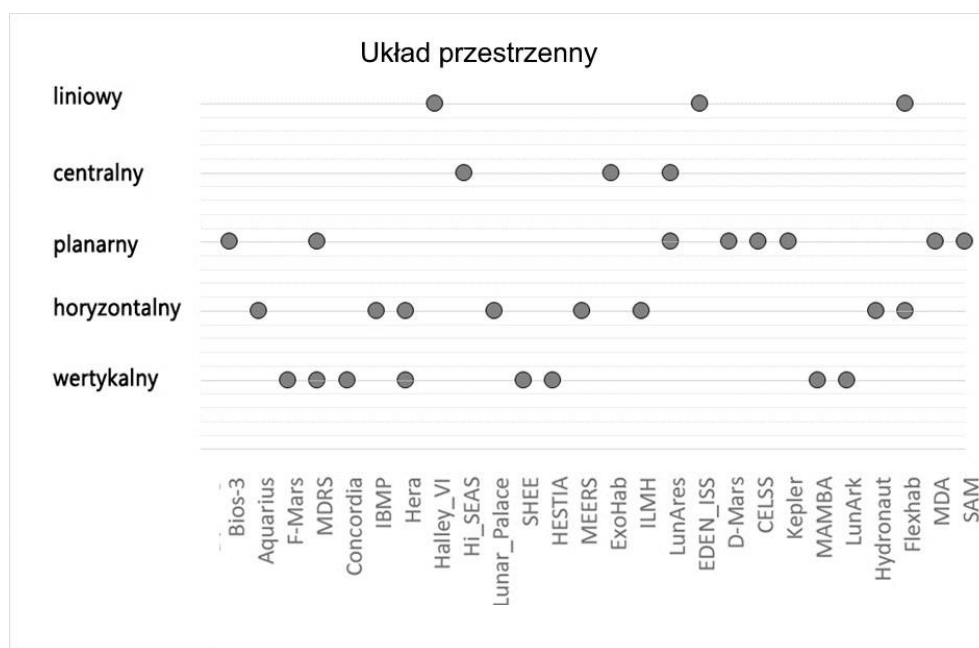


Rysunek 6.24: Forma przestrzenna AHK. Niektóre AHK wykorzystują więcej niż jedną formę przestrzenną. (Opracowanie własne).



Rysunek 6.25: Forma geometryczna AHK. Niektóre AHK wykorzystują więcej niż jedną formę geometryczną. (Opracowanie własne).

Cylindry dominują jako najczęściej spotykana forma geometryczna w AHK (Rys. 6.25). Ta forma doskonale symuluje pojemnik ciśnieniowy i jej użycie na Ziemi, nawet w warunkach zmiennego ciśnienia, nie wymaga szczególnej optymalizacji geometrii. Z drugiej strony, kapsuły znajdują zastosowanie głównie w prawdziwych obiektach pracujących w odmiennych warunkach ciśnieniowych, takich jak Aquarius i Hydronaut, a także w rozkładanej konstrukcji LunArk. Kopuły często spotykane są w strukturach połączonych z bryłami prostopadłościanów. Jako niezależne formy pojawiają się tylko w dwóch placówkach: HI_SEAS i Kepler. Formy graniastosłupowe, które nie są prostopadłościanami, pojawiają się stosunkowo rzadko, najprawdopodobniej dlatego, że najmniej efektywnie symulują struktury ciśnieniowe. MDRS zawiera nieforemne struktury na swoim terenie, podczas gdy LunAres, pomimo użycia kontenerów morskich i kopuły geodezyjnej, posiada obiekt o nieregularnym obrysie. D-Mars jako struktura rozkładana również prezentuje nieregularną formę. SAM wykorzystuje specyficzną geometrię oryginalnego modułu prototypowego Biosphere 2. Prostopadłościany najczęściej pojawiają się w największych habitatach. Placówki, które zajmują się wertykalnymi uprawami żywności, wykorzystują formę prostopadłościanu, aby zoptymalizować przestrzeń przeznaczoną na uprawy. Pomimo swoich niewielkich rozmiarów FlexHab również korzysta z prostopadłościanu symulując pojedynczy moduł habitatu księżycowego (Rys. 6.26).



Rysunek 6.26: Układ przestrzenny AHK (opracowanie własne).

Geometryczne formy analizowanych analogowych habitatów kosmicznych wykazują wyraźne różnice w układach ich struktur (Rys. 6.26). Bryły obrotowe, takie jak cylindry i kapsuły charakteryzują się układami horyzontalnymi lub wertykalnymi. Cylindry i kapsuły o układzie horyzontalnym zwykle są jednopoziomowe, z funkcjami zaprojektowanymi wzdłuż traktów komunikacyjnych, co oznacza, że średnica jest zazwyczaj mniejsza od średnicy habitatów w układzie wertykalnym. Układy wertykalne często pozwalają na

zaprojektowanie struktur wielopoziomowych, z wyjątkiem habitatów takich jak SHEE. Cechują się one większymi średnicami obiektów, z funkcjami rozmieszczonymi wzdłuż obwodów cylindrów lub kapsuł. Takie układy najczęściej występują w strukturach o monolitycznym typie logistycznym, symulując habitaty posiadające pełny program funkcjonalny zawarty w jednym module. Moduły te mogą być wyniesione w kosmos podczas pojedynczego startu rakiety, co jest zgodne z obecnymi koncepcjami agencji kosmicznych przyszłego lądownika księżycowego dla programu Artemis. Obiekty prostopadłościennne, takie jak te o większej powierzchni, najczęściej prezentują układy planarne, centralne oraz liniowe. Układ liniowy jest typowy dla habitatów o pojedynczej głównej funkcji, reprezentujących jeden moduł w potencjalnie większym założeniu modułowym.

6.2 Determinanty w kształtowaniu formy analogowych habitatów kosmicznych

Przeprowadzona powyżej analiza danych pokazuje, że istnieje wiele różnorodnych typów analogowych habitatów kosmicznych, które różnią się pod względem cech technologicznych, operacyjnych i naukowych. Można zauważyć pewne trendy i korelacje między tymi cechami, a determinantami funkcji i formy habitatów. Można również zauważyć rosnącą liczbę analogowych habitatów kosmicznych oraz obiecujące perspektywy na przyszłość. Na podstawie przeprowadzonych analiz można wyciągnąć wniosek, że analogowe habitaty kosmiczne jako obiekty służące do badania i symulowania różnych aspektów załogowych misji kosmicznych na Ziemi posiadają determinanty decydujące o ich funkcji i formie wynikające bezpośrednio z potrzeb programów kosmicznych oraz związanych z nimi wymogów inżynierskich. Determinanty te w różnym stopniu wpływają na przeanalizowane cechy technologiczne, operacyjne oraz naukowe jak również na ostateczne formy i rozkład funkcji AHK. Określonymi przez autora determinantami są:

Logistyka kosmiczna i architektura kosmiczna określają sposób transportu i montażu habitatów w przestrzeni kosmicznej, a także wpływają na ich rozmiar, kształt i masę. Na przykład, habitaty monolityczne są łatwiejsze do wyniesienia w jednej owiewce rakiety, ale mają ograniczoną elastyczność konfiguracji, podczas gdy habitaty modułowe wymagają większej liczby startów i połączeń, ale oferują większą możliwość rozbudowy i wymiany komponentów. Lokalizacja analogowych habitatów kosmicznych wpływa również na logistykę ich użytkowania. Wspomniane determinanty mają zatem wpływ na cechy technologiczne oraz operacyjne, jak również formę i funkcję AHK.

Symulowana architektura misji określa scenariusz i cele badawcze analogowej symulacji misji kosmicznej, a także wpływa na liczebność i skład załogi, czas trwania i harmonogram misji, oraz procedury operacyjne i komunikacyjne. Na przykład, symulacje misji księżycowych lub marsjańskich wymagają odwzorowania warunków środowiskowych, takich jak opóźnienie sygnału czy ograniczone zasoby, podczas gdy symulacje misji orbitalnych wymagają odwzorowania warunków podróży międzyplanetarnej, takich jak izolacja czy monotonia. Architektura misji ma największy wpływ na cechy operacyjne,

naukowe oraz technologiczne, jak również formę i funkcję AHK.

Główny cel badawczy określa główną tematykę naukową lub technologiczną, która jest realizowana w ramach analogowego habitatu kosmicznego, a także wpływa na jego wyposażenie i funkcjonalność. Na przykład, habitaty skupiające się na produkcji żywności mają duży udział powierzchni przeznaczony na uprawy roślinne i systemy recyklingu wody i powietrza, podczas gdy habitaty skupiające się na czynnikach ludzkich mają duży udział powierzchni przeznaczony na życie codzienne i pracę naukową. Cel badawczy znacząco wpływa na długość przeprowadzanych analogowych symulacji misji. Wpływa on więc na cechy operacyjne, naukowe oraz technologiczne, jak również formę i funkcję AHK.

6.3 Typologia analogowych habitatów kosmicznych

Analizy przeprowadzone na podstawie dostępnych danych mają dużą wartość w uporządkowaniu wiedzy o analogowych habitatach kosmicznych. Pozwalają one na zidentyfikowanie kluczowych determinantów wpływających na kształtowanie cech tych obiektów, takich jak ich typ, lokalizacja czy cele badawcze. Na tej podstawie można ustalić typologię różnych rodzajów analogowych habitatów kosmicznych oraz wyciągnąć wnioski dotyczące ich potencjalnych kierunków rozwoju. Są to habitaty:

- symulacyjne
- prototypowe
- biotechnologiczne
- adaptowane

A. Habitaty Symulacyjne



Cechy Technologiczne: Umiarkowana wierność

Typ obiektu: Spin-in

Cechy Operacyjne: Wysoka wierność

Załoga: 4-6

Cechy Naukowe: Wysoka wierność

Główny cel badawczy: Czynniki Ludzkie

Powierzchnia: 62 m² - 171,2 m²

Powierzchnia na osobę: 10 m² - 37 m²

Przeważające funkcje: funkcje życiowe

Przeważające formy: mieszane

Obiekty: FMARS, MDRS, IBMP, HI_SEAS,
LunAres, D-Mars, MDA, SAM

Rysunek 6.27: Najważniejsze cechy charakterystyczne AHK symulacyjnych (opracowanie własne).

- **A. Habitaty symulacyjne** służą głównie do badań nad czynnikami ludzkimi w warunkach izolacji i odosobnienia. Ich najważniejsze cechy zestawione są na Rys. 6.27. Znajdują się zazwyczaj w odległych i trudno dostępnych miejscach na Ziemi, takich jak pustynie, góry czy Arktyka oraz w obiektach umożliwiających izolację. Ich przykładami to FMARS, MDRS, IBMP, HI-SEAS, LunAres, D-Mars, MDA i SAM. Charakteryzują się wysokim stopniem niezależności od zewnętrznych źródeł zaopatrzenia. Ich forma i funkcja są dostosowane do potrzeb symulacji misji kosmicznej, w tym do odwzorowania warunków środowiskowych, procedur operacyjnych i komunikacyjnych oraz celów badawczych. Wymagają one specjalistycznej logistyki i wsparcia technicznego ze względu na trudne warunki i wymagania technologiczne. Habitaty symulacyjne mają zwykle wysoki poziom wierności operacyjnej i naukowej ponieważ pozwalają na przeprowadzanie długich i realistycznych symulacji misji kosmicznych z udziałem ludzi. Ich poziom wierności technologicznej jest umiarkowany, ponieważ nie zawsze odzwierciedlają zaawansowane technologie kosmiczne, takie jak systemy podtrzymywania życia czy skafandry kosmiczne. Habitaty symulacyjne mają zróżnicowaną powierzchnię całkowitą, od 62 m² do 171,2 m², w zależności od lokalizacji, konstrukcji i celów badawczych. Powierzchnia na jednego członka załogi waha się od 10 m² do 37 m², co sugeruje różny poziom komfortu i przestrzeni osobistej dla uczestników symulacji. Habitaty przeznaczone do długoterminowych symulacji misji (ponad rok) mają większą powierzchnię na jednego członka załogi (27,4 m² do 37 m²) niż te przeznaczone do krótkoterminowych symulacji (10 m² do 21,6 m²), co jest związane z potrzebą zapewnienia lepszych warunków życiowych i zapobiegania stresowi i konfliktom w załodze. Habitaty symulacyjne mają największy udział funkcji życiowych, ponieważ służą do badania czynników ludzkich i psychologii grupowej w realistycznych warunkach misji kosmicznych. Funkcje pracy i komunikacji zajmują około 30 procent powierzchni, a podsystemy są stosunkowo niewielkie i nieskomplikowane. Habitaty symulacyjne posiadają różne typy logistyczne oraz formy. Placówki powstałe przed 2014 rokiem często bywały monolityczne oraz operowały na bryłach obrotowych zawierając większość funkcji w ramach jednej bryły geometrycznej, często opartej na kształcie cylindra lub kopuły. W późniejszych latach powstawało więcej placówek prostopadłościennych oraz modułarnych.

B. Habitaty Prototypowe



Cechy Technologiczne: Wysoka wierność

Typ obiektu: Spin-off

Cechy Operacyjne: Umiarkowana wierność

Załoga: 1-4

Cechy Naukowe: Wysoka wierność

Główny cel badawczy: Inżynieria

Powierzchnia: 12,3 m² - 83,6 m²

Powierzchnia na osobę: 6,1 m² - 21,6 m²

Przeważające funkcje: funkcje pracy

Przeważające formy: monolityczne, kapsuły, cylindry

Obiekty: HERA, SHEE, HESTIA, EDEN_ISS, FlexHab, MDA LunArk

Rysunek 6.28: Najważniejsze cechy charakterystyczne AHK prototypowych (opracowanie własne).

- B. Habitaty prototypowe** służą do testowania konstrukcji i ergonomii habitatów kosmicznych na Ziemi. Ich najważniejsze cechy zestawione są na Rys. 6.28. Znajdują się zazwyczaj w ośrodkach badawczych lub przemysłowych, gdzie mają dostęp do specjalistycznej infrastruktury i wsparcia technicznego. Charakteryzują się dużą elastycznością konfiguracji i możliwością rozbudowy oraz wymiany komponentów. Ich forma i funkcja są dostosowane do potrzeb testowania różnych rozwiązań technologicznych i operacyjnych, w tym systemów podtrzymywania życia, wyposażenia wnętrza oraz interfejsów użytkownika. Wymagają one specjalistycznej logistyki i wsparcia technicznego ze względu na wysokie wymagania technologiczne. Habitaty prototypowe mają zwykle wysoki poziom wierności technologicznej umiarkowany poziom wierności naukowej, ponieważ służą do testowania różnych rozwiązań konstrukcyjnych i inżynierskich, ale niekoniecznie do pełnych symulacji misji kosmicznych. Z tego również powodu poziom wierności operacyjnej jest umiarkowany lub niski, ponieważ nie są wykorzystywane w trudnych warunkach środowiskowych ani nie mają stałej aktywności badawczej. W przypadku tych habitatów powierzchnia całkowita waha się od 12,3 m² do 83,6 m². W tej grupie znajdują się obiekty przeznaczone dla załóg nieprzekraczających czterech osób. Szczególnie małe powierzchnie mają te spośród nich, które skupiają się na badaniu pojedynczego aspektu technologicznego z uwagi na brak pełnego zakresu funkcjonalnego: LunArk, MAMBA, EDEN_ISS, Flexhab,. Powierzchnia na jednego członka załogi w habitatach prototypowych waha się od 6,1 m² do 21,6m², co jest znacznie mniej niż w przypadku habitatów symulacyjnych lub biotechnologicznych. Oznacza to, że te habitaty zapewniają inny komfortu i przestrzeni życiowej dla długoterminowych symulacji misji kosmicznych lub mogą efektywniej korzystać z dostępnej przestrzeni. Habitaty prototypowe mają największy udział funkcji pracy, ponieważ służą do testowania różnych rozwiązań inżynierskich i architektonicznych związanych z funkcjonowaniem

habitatów kosmicznych. Funkcje życiowe są ograniczone lub nie są badane, a podsystemy są często głównym celem badań. Habitaty prototypowe mają zwykle różne typy logistyczne a formy geometryczne to najczęściej cylindry oraz kapsuły. Obiekty te przyjmują formę pojemników ciśnieniowych co bezpośrednio odpowiada formom modułów kosmicznych. Habitaty prototypowe często mają formę rozkładaną lub nadmuchiwaną, która pozwala na zwiększenie objętości dostępnej przestrzeni życiowej i badawczej, podczas gdy sama struktura pozostaje kompaktowa podczas transportu. Jest to korzystne z punktu widzenia logistyki i mobilności tych habitatów.

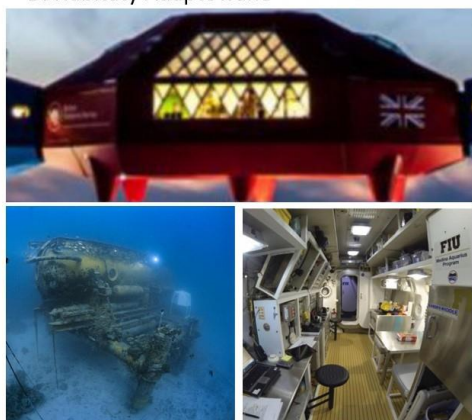


Rysunek 6.29: Najważniejsze cechy charakterystyczne AHK biotechnologicznych (opracowanie własne).

- **C. Habitaty biotechnologiczne** skupiają się na produkcji żywności w warunkach zamkniętego ekosystemu. Najważniejsze cechy zestawione są na Rys. 6.29. Znajdują się zazwyczaj w ośrodkach badawczych lub przemysłowych, gdzie mają dostęp do specjalistycznej infrastruktury i wsparcia technicznego. Charakteryzują się dużym udziałem powierzchni przeznaczonej na uprawy roślinne oraz systemy recyklingu wody i powietrza. Ich forma i funkcja są dostosowane do potrzeb produkcji żywności w warunkach zamkniętego ekosystemu, w tym do zapewnienia odpowiedniego oświetlenia, temperatury, wilgotności oraz składu chemicznego powietrza i wody. Wymagają one specjalistycznej logistyki i wsparcia technicznego ze względu na trudne warunki i wymagania technologiczne. Habitaty biotechnologiczne mają zwykle typ logistyki modułowej, składającą się z kilku elementów połączonych ze sobą. Te elementy często zawierają systemy podtrzymywania życia i uprawy żywności. Przykładami takich habitatów są EDEN_ISS, Lunar-Palace, CELSS, SAM. Habitaty biotechnologiczne mają zwykle wysoki poziom wierności technologicznej i naukowej, ponieważ skupiają się na badaniu systemów podtrzymywania życia i produkcji żywności w zamkniętym środowisku. Ich poziom wierności operacyjnej jest umiarkowany, ponieważ nie prowadzą pełnych symulacji misji kosmicznych, a ich eksploatacja

jest ograniczona przez długie okresy trwania badań. Habitaty skupiające się na produkcji żywności prezentują znacznie większy zakres powierzchni całkowitej, od 28,3 m² (EDEN_ISS) do 530 m² (CELSS), co wynika z ich charakteru biotechnologicznego i potrzeby zapewnienia odpowiednich warunków dla upraw roślinnych. Są one przeznaczone dla niewielkich, 4-osobowych załóg lub nawet pojedynczych osób. Powierzchnia na jednego członka załogi w habitatach skupiających się na produkcji żywności waha się od 28,3 m² do 129 m², co jest znacznie większą wartością niż w przypadku habitatów symulacyjnych lub prototypowych. Habitaty biotechnologiczne mają największy udział podsystemów z funkcji, ponieważ służą do badania systemów podtrzymywania życia i biotechnologii związanej z uprawą roślin w zamkniętym środowisku. Funkcje życiowe są niewielkie lub ich brak, a funkcje pracy i komunikacji są związane z obsługą i monitorowaniem podsystemów.

D. Habitaty Adaptowane



Cechy Technologiczne: Umiarkowana wierność

Typ obiektu: Spin-in

Cechy Operacyjne: Niska/Wysoka wierność

Załoga: 3-30

Cechy Naukowe: Umiarkowana wierność

Główny cel badawczy: wynikający ze specyfiki obiektu

Powierzchnia: różna

Powierzchnia na osobę: różna

Przeważające funkcje: różnie

Przeważające formy: różnie

Obiekty: Aquarius, Concordia, Halley VI, Hydronaut

Rysunek 6.30: Najważniejsze cechy dotyczące AHK adaptowanych (opracowanie własne)

- **D. Habitaty adaptowane** składają się z istniejących stacji arktycznych oraz habitatów podwodnych, które zostały przystosowane do celów badawczych związanych z misjami kosmicznymi (Rys. 6.30). Znajdują się one w odległych i trudno dostępnych miejscach na Ziemi, takich jak Arktyka czy głębiny oceaniczne. Charakteryzują się dużymi różnicami w cechach technologicznych, operacyjnych i naukowych, w porównaniu z innymi typami habitatów analogowych. Ich forma i funkcja są dostosowane do warunków panujących w danym miejscu oraz do celów badawczych związanych z misjami kosmicznymi. Wymagają one specjalistycznej logistyki i wsparcia technicznego ze względu na trudne warunki i wymagania technologiczne. Habitaty adaptowane mają zwykle umiarkowany poziom wierności technologicznej i naukowej, ponieważ nie są specjalnie zaprojektowane dla celów kosmicznych. Ich poziom wierności operacyjnej jest zależny od placówki i

środowiska, ponieważ mogą być wykorzystywane do analogowych symulacji misji w ekstremalnych warunkach środowiskowych, ale nie mają wysokiego potencjału powtarzalności badań. Habitaty adaptowane mają zróżnicowany rozkład funkcji, w zależności od charakteru i pochodzenia struktury lub środowiska, które są wykorzystywane jako analogi dla warunków kosmicznych. Habitaty adaptowane mają zwykle formę mieszaną, wykorzystującą istniejące struktury lub komercyjne rozwiązania konstrukcyjne i łącząc je z dodatkowymi modułami lub elementami. Przykładami takich habitatów są Aquarius, Concordia, Halley_VI, Hydronaut.

7 Wnioski i dalsze prace badawcze

7.1 Przeprowadzone analizy

Analizy przeprowadzone na podstawie zebranych danych służą do uporządkowania wiedzy o analogowych habitatach kosmicznych. Pozwalają one na zidentyfikowanie kluczowych determinantów wynikających z dziedziny załogowych lotów kosmicznych, a wpływających na kształtowanie cech AHK, takich jak cechy technologiczne, operacyjne, ich lokalizacja, cele badawcze, jak również forma i funkcja. Na tej podstawie można ustalić typologię analogowych habitatów kosmicznych oraz wyciągnąć wnioski dotyczące ich potencjalnych kierunków rozwoju. Opisane typy w zależności od ich celów badawczych i charakteru konstrukcji to:

- Habitaty symulacyjne służą do przeprowadzania realistycznych symulacji misji kosmicznych i badania czynników ludzkich, takich jak izolacja, psychologia grupowa, komunikacja czy procedury operacyjne. Przykładami takich habitatów są MDRS, HI_SEAS, LunAres czy D-Mars oraz MDA.
- Habitaty prototypowe służą do testowania różnych rozwiązań inżynierskich i architektonicznych związanych z budową i funkcjonowaniem habitatów kosmicznych. Przykładami takich habitatów są HERA, SHEE, HESTIA, MAMBA czy FlexHab.
- Habitaty biotechnologiczne służą do badania systemów podtrzymywania życia i biotechnologii związanej z uprawą roślin w zamkniętym środowisku. Przykładami takich habitatów są Bios-3, EDEN_ISS, Lunar_Palace czy CELSS.
- Habitaty adaptowane służą do wykorzystania istniejących struktur lub środowisk jako analogów dla warunków kosmicznych. Przykładami takich habitatów są Aquarius, Concordia, Halley VI czy Hydronaut.

Warto jednak zauważyć, że wiele habitatów może przejawiać cechy więcej niż jednego typu i możliwe są nowe typy habitatów, które będą odpowiadać na nowe potrzeby i wyzwania związane z przyszłymi misjami kosmicznymi, czego przykładem jest SAM łączący cechy habitatu symulacyjnego oraz biotechnologicznego. Dlatego też, typologia analogowych habitatów kosmicznych nie jest stała i może być modyfikowana lub rozszerzana w zależności od rozwoju tej dziedziny. Ważne są dalsze badania i dyskusja z na temat przyszłego kierunku badań nad analogowymi habitatami kosmicznymi. Przeprowadzone analizy pozwalają na lepsze zrozumienie roli i znaczenia analogowych habitatów kosmicznych w przygotowaniach do przyszłych misji kosmicznych. Wyciągnięte wnioski, odnoszące się do determinantów w

kształtowaniu tych obiektów mogą być wykorzystane do planowania i realizacji przyszłych podobnych projektów, zarówno w zakresie badań naukowych, jak i treningu astronautów. Dzięki temu możliwe będzie dalsze rozwijanie i poszerzanie naszej wiedzy na temat załogowych lotów kosmicznych.

7.2 Odpowiedzi na pytania badawcze

Na początku rozprawy były postawione pytania badawcze. Poniżej zostały one przypomniane oraz uzupełnione o odpowiedzi wynikające z przeprowadzonych analiz:

1. Co to jest analogowa symulacja misji oraz analogowy habitat kosmiczny?

Analogowa symulacja misji jest aktywnością zaprojektowaną by odwzorować określone naukowe, techniczne oraz operacyjne aspekty przyszłych misji kosmicznych używając prawdziwych albo funkcjonalnie reprezentatywnych systemów, działań czy procedur w analogicznych warunkach środowiskowych, w celu zrozumienia wydajności oraz interakcji pomiędzy tymi systemami, działaniami oraz procedurami, jak również ich możliwości w zakresie osiągnięcia celów misji w sposób pozwalający na obserwacje w sposób ciągły.

Analogowe symulacje misji kosmicznych odgrywają kluczową rolę w przygotowywaniu załóg i technologii do rzeczywistych warunków kosmicznych. Symulacje te umożliwiają badanie interakcji między załogą, a złożonymi systemami kosmicznymi w warunkach zbliżonych do tych, które mogą napotkać w przestrzeni kosmicznej. Należy podkreślić, że takie symulacje nie tylko odwzorowują aspekty techniczne i operacyjne misji, ale także pozwalają na eksplorację czynników psychologicznych i społecznych, które są niezbędne do zrozumienia dynamiki zespołowej oraz zdolności adaptacyjnych ludzi w izolacji i ograniczonych warunkach życiowych. To podejście jest nieocenione w kontekście długotrwałych misji kosmicznych, gdzie zarówno zdrowie psychiczne, jak i fizyczne załogi, są równie istotne jak sprawność techniczna. Wyniki tych symulacji dostarczają cennych informacji dla przyszłych misji, pozwalając na optymalizację procedur, technologii oraz strategii zarządzania zespołem.

Analogowy habitat kosmiczny jest narzędziem badawczym służącym do przeprowadzania testów analogowych oraz analogowych symulacji misji w określonych warunkach. Analogowe habitaty kosmiczne uwzględniają analogowe, analogiczne oraz testowe placówki, a ich forma i funkcja zależy od założonych działań analogowych. Jest narzędziem badawczym służącym do przeprowadzania testów analogowych oraz analogowych symulacji misji w określonych warunkach. Analogowe habitaty kosmiczne uwzględniają analogowe, analogiczne oraz testowe placówki, a ich forma i funkcja zależy od założonych działań analogowych. W kontekście analogowych habitatów kosmicznych, należy zwrócić uwagę na ich zróżnicowaną naturę i szeroki zakres zastosowań. Te specjalnie zaprojektowane środowiska umożliwiają badanie i testowanie systemów

podtrzymywania życia, technologii recyklingu i produkcji żywności, a także innych innowacyjnych rozwiązań, które mogą zostać zastosowane w przyszłych misjach kosmicznych. Habitaty te oferują unikatową platformę do testowania i doskonalenia technologii w otoczeniu imitującym warunki na innych planetach, co ma fundamentalne znaczenie dla zapewnienia trwałości i bezpieczeństwa baz kosmicznych. Badania przeprowadzone w tych środowiskach mogą przynieść korzyści również na Ziemi, oferując rozwiązania dla wyzwań związanych ze zrównoważonym życiem w zamkniętych ekosystemach, co ma szczególne znaczenie w kontekście zmian klimatycznych i zrównoważonego rozwoju. Kluczowe jest zrozumienie, że zarówno analogowe symulacje misji, jak i analogowe habitaty kosmiczne są nie tylko narzędziami przygotowawczymi do przyszłych misji kosmicznych, ale także stanowią ważne źródło wiedzy i innowacji, które mogą znaleźć zastosowanie w wielu aspektach życia na Ziemi.

2. Jaka rolę pełnią analogowe habitaty kosmiczne w badaniach nad załogową eksploracją kosmosu?

Celem konstruowania analogowych habitatów kosmicznych jest badanie różnych aspektów związanych z załogowymi lotami kosmicznymi. Przeprowadzone badania literaturowe pozwoliły ustalić szeroki wachlarz potencjalnych działań analogowych, które mogą być realizowane w AHK. Najważniejsze aspekty badawcze, które ostatecznie otrzymały odzwierciedlenie w typologii AHK to:

- prototypowanie kosmicznej architektury pod kątem inżyneryjnym,
- prototypowanie kosmicznej architektury pod kątem inżyneryjnym,
- badanie czynników ludzkich poprzez symulacje załogowych misji kosmicznych,
- trening załogi oraz testy biotechnologiczne systemów podtrzymywania życia oraz zamkniętych ekosystemów.

W ciągu kilkunastu lat, dziedzina badań analogowych znacząco zyskała na znaczeniu w strategiach państwowych agencji kosmicznych. Analogowe habitaty kosmiczne stanowią nieocenione laboratoria dla testowania i doskonalenia technologii niezbędnych do długotrwałych misji załogowych. Zapewniają one unikalną możliwość symulowania życia i pracy w środowiskach ekstremalnych oraz analogicznych do pozaziemskich, co jest krytyczne dla zrozumienia wyzwań związanych z życiem w izolacji, ograniczonej przestrzeni i ekstremalnych warunkach. Te symulacje pozwalają na eksperymentowanie z różnymi konfiguracjami życia grupowego, co jest kluczowe dla opracowania skutecznych strategii zarządzania załogą konfliktami. Dodatkowo, AHK umożliwiają badanie wpływu długotrwałej izolacji na zdrowie psychiczne i fizyczne astronautów, co ma bezpośredni wpływ na sukces misji. Wnioski z tych badań przekładają się na opracowanie procedur, które mogą zwiększyć skuteczność pracy załogi, ich dobrostan oraz bezpieczeństwo podczas rzeczywistych misji kosmicznych.

Rola AHK w badaniach nad załogową eksploracją kosmosu obejmuje również rozwój i testowanie technologii oraz strategii systemów podtrzymywania życia, które są kluczowe dla długotrwałych misji pozaziemskich. Badania te koncentrują się na takich aspektach jak recykling zasobów, produkcja żywności w zamkniętych ekosystemach oraz utrzymanie zdrowia fizycznego i psychicznego załogi. Praca w tych środowiskach pozwala na identyfikację potencjalnych problemów i niedoskonałości technologii, co jest niezbędne do ich udoskonalenia przed wykorzystaniem w rzeczywistych warunkach kosmicznych. Ponadto, AHK pełnią ważną rolę w edukacji i szkoleniu przyszłych astronautów, oferując im realistyczne doświadczenie pracy w środowiskach przypominających te, które mogą napotkać w kosmosie. Takie doświadczenie jest nieocenione w przygotowaniu mentalnym i fizycznym załóg do wyzwań związanych z eksploracją kosmiczną.

3. Jakie powinny być kryteria oceny AHK?

W wyborze i definiowaniu kryteriów oceny analogowych habitatów kosmicznych (AHK) zastosowano podejście oparte na dogłębnych badaniach literaturowych oraz historycznych analizach zawartych w raportach i publikacjach NASA oraz ESA. Te instytucje kosmiczne, będące pionierami w eksploracji kosmicznej, dostarczyły bogatej bazy danych i studiów przypadków, które pozwoliły na zrozumienie kluczowych aspektów technologicznych, operacyjnych i naukowych niezbędnych dla skutecznego modelowania i symulacji warunków misji kosmicznych. Analiza tych materiałów była nieocenionym źródłem wiedzy, umożliwiającym stworzenie kompleksowego systemu kryteriów oceny AHK, które są niezbędne do oceny gotowości technologii i procedur na potrzeby przyszłych misji załogowych w kosmosie. Kryteria oceny AHK zostały określone pod kątem tego co analogowe habitaty kosmiczne symulują bądź testują. Kryteria te są zdefiniowane na podstawie kluczowych cech technologicznych, operacyjnych i naukowych, jak również architektury i funkcjonalności habitatów. Oto szczegółowe wypunktowanie kryteriów z uwzględnieniem powodów ich uwzględnienia:

(a) Cechy technologiczne

- *Typologia architektury kosmicznej* : ocena typu architektury uwzględnia różne modele konstrukcyjne, co jest istotne dla zrozumienia jak różne podejścia projektowe wpływają na funkcjonalność i wydajność habitatów.
- *System konstrukcyjny* : analiza systemu konstrukcyjnego pozwala na ocenę wytrzymałości, bezpieczeństwa i adaptacji obiektów do warunków kosmicznych.
- *Wyzwania środowiskowe*: uwzględnienie tych wyzwań pomaga zrozumieć, w jakim stopniu habitat jest przystosowany do ekstremalnych warunków, takich jak te panujące w kosmosie.

- *Typ konstrukcji Spin-In i Spin-Off* : to kryterium bada wpływ technologii opracowanych dla AHK na inne dziedziny i odwrotnie, co jest ważne dla innowacyjności i praktycznego zastosowania.
- *Poziom gotowości technologicznej (TRL)*: ocena TRL pozwala na określenie, w jakim stadium rozwoju są technologie używane w AHK i ich gotowość do zastosowania w realnych misjach kosmicznych.
- *Jakość wykonania i użyte materiały*: te aspekty są istotne dla oceny trwałości, funkcjonalności i bezpieczeństwa AHK.
- *Poziom wierności technologicznej* : ocena, w jakim stopniu habitaty odwzorowują realną technologię kosmiczną.

(b) Cechy operacyjne

- *Liczba członków załogi i długość symulacji* : te dane pomagają określić skuteczność habitatów w symulowaniu realnych warunków pracy załogi.
- *Aktualny status i intensywność działań*: ocena tych aspektów daje wgląd w aktualne wykorzystanie i efektywność AHK.
- *Charakter działań analogowych i poza-analogowych*: informacje te pozwalają zrozumieć wszechstronność i elastyczność AHK w różnych scenariuszach badawczych.
- *Poziom wierności operacyjnej* : ocena, w jakim stopniu habitaty odwzorowują symulowany scenariusz misji.

(c) Cechy naukowe

- *Dyscypliny naukowe i obszary działań*: to kryterium pozwala ocenić w jakim zakresie AHK przyczyniają się do postępu w różnych dziedzinach naukowych.
- *Ilość i jakość publikacji naukowych*: analiza tej cechy pokazuje wpływ badań przeprowadzonych w AHK na szerszą społeczność naukową.
- *Forma przestrzenna i układ funkcjonalny* : te aspekty są ważne dla zrozumienia, jak projektowanie przestrzeni wpływa na efektywność i komfort pracy załogi.
- *Poziom wierności naukowej* : ocena, w jakim stopniu habitaty mają udział w badaniach naukowych.

(d) Metraż i Objętość Przestrzeni Użytkowej

Analiza tych danych umożliwia ocenę, jak dobrze AHK symulują warunki życiowe w przestrzeni kosmicznej i efektywność wykorzystania dostępnej przestrzeni.

Włączenie tych kryteriów do oceny AHK pozwala na kompleksową i wielowymiarową analizę ich skuteczności i przydatności w kontekście przygotowań do misji kosmicznych.

4. Jaki wpływ mają założenia naukowe, technologiczne i operacyjne na formę i funkcję AHK?

Analogowe habitaty kosmiczne symulują poszczególne aspekty architektury kosmicznej, które wedle definicji podzielono na działania naukowe,

technologiczne oraz operacyjne. Cel badawczy w jakim habitat został stworzony, wpływa na funkcję oraz formę AHK. Obiekty mające być wiernym analogiem ergonomii oraz inżynierii, skupiają się na aspektach technologicznych i zwykle posiadają mniejsze rozmiary niż habitaty konstruowane do symulacji zagadnień operacyjnych. Największą powierzchnię mają habitaty biotechnologiczne. Wielkość i funkcja habitatu wpływają na procentowy udział powierzchni przeznaczonych na określone funkcje. W habitatach prototypowych nastawionych na badanie ergonomii oraz inżynierii systemów, przestrzeń do pracy oraz do życia zajmują podobne ułamki całkowitej powierzchni, habitaty symulacyjne większość powierzchni przeznaczają na funkcje życiowe i komunikację. Habitaty skupiające się na uprawie żywności mają ograniczoną przestrzeń do życia, natomiast bardzo rozwiniętą funkcję podsystemów. Również formy przestrzenne AHK są w dużym stopniu uzależnione od zakładanych funkcji habitatu – obiekty skupione na technologii oraz inżynierii systemów najczęściej upodabniane są do istniejących habitatów kosmicznych i mają kształt cylindrów i/lub kapsułów. AHK których zadania skupiają się na cechach operacyjnych i naukowych często mają formy jednoprzestrzenne o większej powierzchni. W przypadku habitatów, których funkcje skupiają się na cechach operacyjnych często wybierane są rozwiązania ekonomiczne bez nacisku na ergonomię, a z kolei w habitatach biotechnologicznych wielkopowierzchniowe rozwiązania związane są z maksymalizacją przestrzeni uprawnej roślin.

Założenia naukowe często kształtują AHK w kontekście ich zastosowań badawczych. Na przykład, habitaty skoncentrowane na badaniach biotechnologicznych, takie jak systemy podtrzymywania życia czy produkcja żywności, wymagają specyficznych rozwiązań przestrzennych i technologicznych, co wpływa na ich większą powierzchnię oraz rozwinięte podsystemy. Tabela

6.13 (cechy naukowe AHK) w połączeniu z analizą różnych typów AHK pokazuje, że naukowe cele misji wpływają na specyfikację, układ i funkcje tych obiektów, co ma bezpośredni wpływ na ich projektowanie i budowę.

Założenia technologiczne, takie jak poziom gotowości technologicznej (TRL) i typ konstrukcji spin-in/spin-off (tabela 6.5), są kluczowe dla określenia, w jakim stopniu AHK odwzorowują warunki kosmiczne i technologie potrzebne w przyszłych misjach. To bezpośrednio wpływa na ich formę i funkcję. Habitaty o wyższym TRL często charakteryzują się bardziej zaawansowanymi rozwiązaniami technologicznymi, które lepiej odwzorowują rzeczywiste warunki kosmiczne. W końcu, założenia operacyjne, takie jak liczba członków załogi, średnia długość misji oraz intensywność prowadzonych działań (tabela 6.12), mają wpływ na rozmiar, układ i funkcje przestrzenne AHK. Habitaty zaprojektowane do długotrwałych symulacji misji z większymi załogami wymagają więcej przestrzeni do życia i pracy, co ma wpływ na ich ogólną formę i układ funkcjonalny.

Podsumowując, założenia naukowe, technologiczne i operacyjne mają zasadniczy wpływ na kształtowanie formy i funkcji AHK. Różne cele

i wymagania każdego z tych aspektów prowadzą do różnorodności w projektowaniu i konstrukcji tych unikatowych obiektów badawczych, co jest kluczowe dla osiągnięcia ich celów badawczych i treningowych.

5. Jakie można wyróżnić zastosowane systemy konstrukcyjne i ich wpływ na formę i funkcję AHK?

W określeniu systemów konstrukcyjnych AHK skupiono się na obiektach, których konstrukcje były specjalnie dla nich dedykowane, a również na konstrukcjach, które miały odzwierciedlać formalne założenia związane z kosmiczną architekturą takie jak modułowość, czy struktury nadmuchiwane. Obiekty, których konstrukcja była tworzona od podstaw z reguły posiadają lepiej zoptymalizowane rozłożenie funkcji, a swoją formą przypominają bryły ciśnieniowe. Obiekty, w których zastosowano komercyjnie dostępne rozwiązania konstrukcyjnej zazwyczaj są większe, posiadają więcej nieużytkowanej przestrzeni i często są formami prostopadłościennymi lub kopułami. W dyskusji o systemach konstrukcyjnych analogowych habitatów kosmicznych (AHK), należy uwzględnić różnorodność i specyfikę tych systemów oraz ich wpływ na formę i funkcję AHK:

(a) Dedykowane systemy konstrukcyjne

- Charakterystyka: dedykowane systemy konstrukcyjne AHK są projektowane z myślą o specyficznych wymaganiach misji kosmicznych. Takie systemy często odzwierciedlają struktury ciśnieniowe, które są istotne w środowiskach kosmicznych. Przykładem mogą być habitaty o formie cylindrycznej lub kapsułowej, które symulują warunki panujące w statkach kosmicznych lub na stacjach orbitalnych.
- Wpływ na Formę i Funkcję: te konstrukcje charakteryzują się optymalnym wykorzystaniem przestrzeni i ergonomicznym rozkładem funkcji. Są one zwykle mniejsze i bardziej skompaktowane, co umożliwia rozwój inżynierii systemów przyszłych habitatów kosmicznych. Optymalizacja przestrzeni w tych strukturach ma bezpośredni wpływ na symulację realistycznych warunków życia w kosmosie, co jest kluczowe dla badania interakcji załogi i efektywności wykonywania zadań w ograniczonej przestrzeni.

(b) Konstrukcje wykorzystujące gotowe systemy

- Charakterystyka: konstrukcje AHK, które wykorzystują gotowe, komercyjne rozwiązania konstrukcyjne, zazwyczaj oferują więcej przestrzeni, ale mogą posiadać mniej zoptymalizowane rozwiązania pod kątem specyficznych wymagań misji kosmicznych. Często przybierają formę prostopadłościennych brył lub kopuł, co może być bardziej ekonomiczne, ale mniej reprezentatywne dla warunków kosmicznych.
- Wpływ na formę i funkcję: te większe struktury mogą oferować więcej przestrzeni życiowej i roboczej, ale często z większą ilością nieużytkowanej przestrzeni, co może wpływać na dynamikę załogi i efektywność pracy. Możliwość zastosowania modułów komercyjnych umożliwia szybsze i tańsze budowanie oraz łatwość dostosowywania do różnych celów badawczych, jednak może to ograniczać wierność symulacji warunków

kosmicznych. W tych habitatach często eksploruje się inne aspekty życia i pracy w kosmosie, takie jak interakcje społeczne i psychologiczne, niż w bardziej technologicznie zaawansowanych dedykowanych systemach konstrukcyjnych.

6. Czy na podstawie analiz można przewidzieć kierunki rozwoju AHK?

Dzięki przeprowadzonym analizom zaproponowano typologie istniejących analogowych habitatów kosmicznych. Na podstawie przeprowadzonych analiz, w których zidentyfikowano kluczowe determinanty wpływające na kształtowanie cech analogowych habitatów kosmicznych (AHK), takie jak ich cechy technologiczne, operacyjne, lokalizacja, cele badawcze oraz forma i funkcja, można przewidzieć przyszłe kierunki rozwoju tych konstrukcji. Uwzględniając wiedzę o różnorodności funkcji i celów AHK, w tym habitatów symulacyjnych, prototypowych, biotechnologicznych oraz adaptowanych, można przypuszczać, że przyszłe projekty AHK będą dążyć do jeszcze większej specjalizacji i adaptacji do konkretnych potrzeb badawczych i operacyjnych. Równocześnie, nacisk na innowacje w dziedzinie biotechnologii i systemów podtrzymywania życia może przyczynić się do powstania nowych, bardziej zintegrowanych i samowystarczalnych habitatów, które będą lepiej symulować warunki życia w kosmosie. Przewiduje się również, że w miarę rozwoju technologii i zwiększania się dostępnych budżetów, nowe projekty będą mogły lepiej równoważyć kompromis między potrzebami a kosztami, co pozwoli na budowę bardziej zaawansowanych i funkcjonalnych habitatów kosmicznych.

7.3 Dodatkowe pytania wynikające z przeprowadzonych badań

W konsekwencji przeprowadzonych badań pracy autor stawia kilka dodatkowych pytań, które mogą być przedmiotem dyskusji na temat potencjalnych kierunków rozwoju projektów związanych z analogowymi habitatami kosmicznymi¹:

1. Jakie są najważniejsze wyzwania technologiczne, operacyjne i naukowe, które muszą zostać pokonane w celu dalszego rozwoju analogowych habitatów kosmicznych?

Jednym z najważniejszych wyzwań technologicznych, operacyjnych i naukowych, które muszą zostać pokonane w celu dalszego rozwoju analogowych habitatów kosmicznych, jest zapewnienie odpowiedniego poziomu wierności symulacji misji kosmicznych. Obejmuje to rozwijanie zaawansowanych technologii podtrzymywania życia, systemów recyklingu i produkcji żywności, a także zapewnienia odpowiedniego poziomu komfortu i bezpieczeństwa dla uczestników symulacji.

2. Jakie są najbardziej obiecujące kierunki badań i rozwoju w dziedzinie analogowych habitatów kosmicznych, takie jak nowe technologie podtrzymywania życia, systemy recyklingu czy produkcja żywności?

¹Autor, będąc dyrektorem jednej z opisywanych placówek, szuka odpowiedzi na poniższe pytania, które wychodzą poza zakres tematyczny niniejszej pracy

Jednym z najbardziej obiecujących kierunków badań i rozwoju w dziedzinie analogowych habitatów kosmicznych jest dążenie do jak najwyższego poziomu symulacji w celu przeprowadzenia badań zmierzających do odpowiedzi na pytanie, jak różne elementy misji wpływają na realizację celów architektury misji. Również rozwijanie nowych technologii podtrzymywania życia i produkcji żywności w zamkniętym środowisku może przynieść wartościowe rozwiązania dla wyzwań społeczeństw w dobie zmian klimatycznych.

3. Jakie są najważniejsze determinanty sukcesu projektów związanych z analogowymi habitatami kosmicznymi, takie jak finansowanie, współpraca międzynarodowa czy zaangażowanie społeczności naukowej i przemysłowej?

Istotnym determinantem sukcesu projektów związanych z analogowymi habitatami kosmicznymi jest zapewnienie odpowiedniego finansowania i współpracy międzynarodowej. Wymaga to zaangażowania rządów, agencji kosmicznych oraz sektora prywatnego w finansowaniu badań i rozwoju, a także współpracy międzynarodowej w zakresie wymiany wiedzy i doświadczeń.

4. Jakie są potencjalne korzyści dla ludzkości wynikające z dalszego rozwoju analogowych habitatów kosmicznych?

Potencjalne korzyści wynikające z dalszego rozwoju analogowych habitatów kosmicznych obejmują lepsze zrozumienie wpływu długotrwałych misji kosmicznych na ludzi, rozwój nowych technologii oraz poszerzenie wiedzy o naszym Układzie Słonecznym. Może to przyczynić się do poprawy bezpieczeństwa i komfortu astronautów podczas przyszłych misji kosmicznych, a także do rozwoju nowych gałęzi przemysłu i nauki.

5. Jakie są potencjalne zagrożenia i wyzwania etyczne związane z dalszym rozwojem analogowych habitatów kosmicznych, takich jak wpływ na środowisko naturalne, bezpieczeństwo uczestników symulacji czy odpowiedzialność za wyniki badań?

Potencjalne zagrożenia i wyzwania etyczne związane z dalszym rozwojem analogowych habitatów kosmicznych obejmują bezpieczeństwo uczestników symulacji oraz odpowiedzialność za wyniki badań. Wymaga to opracowania odpowiednich standardów i procedur etycznych oraz zapewnienia przejrzystości i odpowiedzialności w prowadzeniu badań.

Badania przeprowadzone w ramach rozprawy doktorskiej pozwoliły na zaproponowanie odpowiedzi na zadane na wstępie pytania badawcze, postawienie nowych pytań i próbę odpowiedzi na nie. Autor zdaje sobie sprawę z tego, że każda odpowiedź rodzi nowe pytania, pokazuje nowe możliwości, wskazuje nowe rozwiązania. Jest to więc nie koniec, a początek drogi motywowanej ciekawością i chęcią zbudowania namacalnych śladów fascynacji architekturą misji kosmicznych i przyszłych instalacji budowanych na Księżycu i być może Marsie. Najnowsza historia przyniosła też inne zastosowania badań analogowych habitatów kosmicznych. Okazało się, że wnioski wyciągane z tych

badania stały się ważne w czasach epidemii Covid-19, kiedy konieczność izolacji ludzi była spowodowana nie misją kosmiczną, a koniecznością izolacji epidemiologicznej.

7.4 Weryfikacja tez pracy

Przeprowadzone analizy oraz sformułowane odpowiedzi na pytania badawcze pozwalają pozytywnie zweryfikować tezy postawione na wstępie niniejszej pracy.

- **Ad. 1. *Obecny stan wiedzy i dostępna literatura pozwalają na określenie determinant w kształtowaniu formy analogowych habitatów kosmicznych.***
- **Ad. 2. *Analiza formy i funkcji analogowych habitatów kosmicznych w oparciu o determinanty umożliwia stworzenie typologii analogowych habitatów kosmicznych.***

7.5 Podsumowanie

Niniejsza praca ma na celu zgromadzenie i uporządkowanie wiedzy związanej z analogowymi habitatami kosmicznymi, w tym: ich typów, cech, determinant w ich kształtowaniu i potencjalnych kierunków rozwoju. Na podstawie dostępnych danych i analiz można stwierdzić, że analogowe habitaty kosmiczne stanowią ważne narzędzie badawcze i treningowe dla przyszłych misji kosmicznych, umożliwiając przeprowadzanie realistycznych symulacji i testowanie nowych technologii w kontrolowanych warunkach jak również w środowiskach ekstremalnych. Jednym z kluczowych wyzwań dla dalszego rozwoju analogowych habitatów kosmicznych jest zapewnienie odpowiedniego poziomu wierności symulacji misji kosmicznych, zarówno pod względem technologicznym, operacyjnym jak i naukowym. Obejmuje to rozwijanie zaawansowanych technologii podtrzymywania życia, systemów recyklingu i produkcji żywności, a także zapewnienie odpowiedniego poziomu komfortu i bezpieczeństwa dla uczestników symulacji. Innym ważnym kierunkiem rozwoju jest wykorzystanie analogowych habitatów kosmicznych do celów treningowych astronautów oraz przygotowywania przyszłych misji księżycowych lub marsjańskich. Może to obejmować rozwijanie specjalistycznych programów szkoleniowych oraz budowę nowych placówek treningowych na Ziemi, które będą odwzorowywać warunki panujące na Księżycu lub Marsie. Równie istotne jest zapewnienie odpowiedniego finansowania i współpracy międzynarodowej w dziedzinie analogowych habitatów kosmicznych. Wymaga to zaangażowania rządów, agencji kosmicznych oraz sektora prywatnego w finansowanie badań i rozwoju, a także współpracy międzynarodowej w zakresie wymiany wiedzy i doświadczeń. W związku z powyższym, można stwierdzić, że analogowe habitaty kosmiczne stanowią ważny element w przygotowaniach do przyszłych misji kosmicznych i mają duży potencjał rozwoju w nadchodzących latach. Dalsze badania i inwestycje w tę dziedzinę mogą przynieść wymierne korzyści dla otoczenia społecznego oraz być narzędziem w ustaleniu determinant dla stałej bazy na Księżycu oraz innych bliskich Ziemi planetach.

Spis rysunków

1.1	Torus kosmiczny Hermana Potočnika, źródło: [3]	10
1.2	Stacja kosmiczna Hermana Obertha, źródło: [4]	10
1.3	Międzynarodowa stacja kosmiczna, źródło: [9]	11
1.4	Moduł <i>Cupola</i> Międzynarodowej Stacji Kosmicznej – okno orbitalne, źródło: [10]	11
1.5	Zestawienie możliwości wynoszenia ładunków na niską orbitę Ziemi, źródło: [12]	12
1.6	Wizja hali LUNA, źródło: [13]	14
1.7	Moon village, źródło: [14]	14
1.8	Koncepcja rozwoju misji programu Artemis, źródło:[15].....	15
1.9	Lunar Gateway, źródło: [16]	16
1.10	Propozycje Human Lander System, źródło: [17]	16
1.11	Historyczne habitaty ludzi: habitaty charakterystyczne dla klimatu umiarkowanego wykonane z drewna i kamienia (A) lub skór (B), igło charakterystyczne dla dalekiej północy wykonane ze śniegu, (D) chata dająca schronienie przed upałem wykonana z gliny i patyków charakterystyczna dla Afryki, źródło: autor	18
1.12	Statki Wostok i Merkury, źródło: [33]	20
1.13	Szczałki Vladimira Komarova, źródło: [36]	20
1.14	Kapsuła Sojuz, źródło: [37]	21
1.15	Sfera Bernala, zewnątrz. źródło:[48]	24
1.16	Sfera Bernala, wewnątrz. źródło:[48]	24
1.17	Torus Stanfordzki. źródło:[48].....	25
1.18	Torus Stanfordzki, wewnątrz. źródło:[48]	26
1.19	Cylinder O'Neill'a, wewnątrz. źródło:[48]	26
1.20	Cylinder O'Neill'a, wewnątrz, źródło: [48]	27
1.21	Najbardziej znani architekci kosmiczni: górny rząd, od lewej – dr Brent Sherwood, od prawej – dr Barbara Imhof, dolny rząd, od lewej – dr Olga Bananova, od prawej – dr Marc Cohen, [50]	28
1.22	Orbital Reef, źródło: [51]	29
1.23	SHEE Habitat, źródło: [52]	29
1.24	I-HAB, źródło: [53].....	30
1.25	Przykład inżynierskiego podejścia projektowego, źródło: [54].....	31
1.26	Cykliczny proces projektowy, źródło: [54].....	32
1.27	Schemat relacji dyscyplin w procesie projektowym opartym na syntezie, źródło: [54]	33
1.28	Porównanie istniejących i planowanych habitatów analogowych, [55]	35

3.1	Aktywności analogowe i kontinuum analogowe, źródło: [57]	42
3.2	Trening na myśliwcah i w czasie lotów parabolicznych, źródło: [59]	44
3.3	Test pustynny oraz trening w wirówce, źródło: [60]	44
3.4	Ben Franklin, źródło: [61].....	45
4.1	Wizualizacja deorbitacji PW-SAT2, źródło: [65].....	48
4.2	Rakieta odrzucająca owiewkę powyżej linii Karmana, źródło: [66]	49
4.3	Rodzina rakiet SLS – Space Launch System NASA. Zestawienie ob-jętości owiewek z maksymalnymi masami ładunku na LEO, GTO oraz TLI. Pierwszy start planowany na 2022 źródło: [67].....	50
4.4	Składowe Architektury Misji źródło: [68]	52
4.5	Mars Direct – schemat lotów oraz ładunków między Ziemią a Marsem na przestrzeni 5 lat, źródło [69]	53
4.6	Oryginalny schemat lotów Mars Semi-Direct 1993, źródło: [69].....	54
4.7	Schemat ładunków trzech rakiet zmierzających na Marsa z koncepcji z 1998 roku, źródło: [70]	55
4.8	Koncepcja nadmuchiwanego habitatu z 1998 roku, źródło: [70].....	55
4.9	Mars Reference Mission 5.0 – schemat misji na Marsa, źródło: [57]	56
4.10	schemat odprowadzania ciepła na ISS, źródło: [54],.....	58
4.11	Schematy rozłożenia funkcji w pojazdach kosmicznych, źródło: [54]	62
4.12	Matryca strefowania oraz wydzielenia funkcji, źródło: [54]	63
4.13	Diagram przestrzeni indywidualnych – socjalnych oraz głośnych – cichych, źródło: [54]	64
4.14	Moduł BEAM, test na ISS, 2016, źródło [86]	66
4.15	Wizja nadmuchiwaných habitatów. Opracowanie zespołu Space is More pod kierownictwem autora, 2015 rok.	66
4.16	Wizja załogowego łazika z nadmuchiwaną nadbudową. Opracowanie zespołu Space is More pod kierownictwem autora, 2019 rok	67
4.17	Mars Dune Alpha, źródło: [87]	67
4.18	Drukowany habitat na Marsie. Opracowanie zespołu Space is More pod kierownictwem autora, 2015 rok.	68
4.19	Myco-architektura, źródło: [89]	68
4.20	Wizja habitatu z przegrodami wypełnionymi algami. Opracowanie zespołu Space is More pod kierownictwem autora, 2018 rok.....	69
4.21	Wizja kolonii schowanej po zacięionej stronie zbocza. Opracowanie zespołu Space is More pod kierownictwem autora, 2019 rok.	70
4.22	Marception, habitat planetarny. Opracowanie zespołu Space is More pod kierownictwem autora, 2019 rok.	70
4.23	Habitat mobilny. Opracowanie zespołu Space is More pod kierownictwem autora, 2019 rok.....	71
4.24	Analogowe skafandry kosmiczne. źródło: LunAres Research Station, prace własne.....	71
4.25	Widok na śluze projektu MaMBA. Opracowanie zespołu Space is More pod kierownictwem autora, 2018 rok.	72
4.26	Poziomy gotowości technologicznej, źródło: [91]	72
4.27	Poziomy gotowości technologicznej w ujęciu habitatów kosmicznych (Habitation Readiness Level), źródło: [11]	73

4.28	TRL dla makiet i symulatorów, źródło: [92].....	74
4.29	Użytkowa objętość pojazdów kosmicznych, źródło: [95].....	76
4.30	Wykres przestrzeni użytkowej na członka załogi w bazach podwod- nych. źródło: [95].....	77
4.31	Zależność kubatury użytkowej od długości misji, źródło: [95]	77
5.1	BIOS-3, źródło: [97].....	82
5.2	Habitat Bios-3. Graficzna prezentacja powierzchni przypadającej na określone funkcje	84
5.3	Aquarius Reef Base, źródło: [99].....	86
5.4	Aquarius Reef Base, źródło: [99].....	86
5.5	Aquarius Reef Base, źródło: [99].....	86
5.6	Aquarius Reef Base. Graficzna prezentacja powierzchni przypada- jącej na poszczególne funkcje	88
5.7	FMARS, źródło: [106]	89
5.8	Ilustracja graficzna powierzchni przypadającej na poszczególne funk- cje habitatu FMARS	91
5.9	MDRS, źródło: [108]	92
5.10	MDRS -rzut, źródło: [108]	93
5.11	Graficzne przedstawienie powierzchni przypadającej na określoną funkcję w MDRS	95
5.12	Stacja Concordia, źródło: [121]	96
5.13	Stacja Concordia źródło: [121]	97
5.14	Graficzne przedstawienie powierzchni przypadających na określoną funkcję w Stacji Concordia	100
5.15	Habitat Mars500 IBMP, źródło: [127]	101
5.16	Habitat Mars500 IBMP, źródło: [127]	101
5.17	Habitat Mars500 IBMP, źródło: [127]	101
5.18	Graficzna prezentacja powierzchni przypadającej na określoną funk- cję w IBMP	104
5.19	Habitat HERA-HDU, źródło: [129].....	104
5.20	Ilustracja graficzna powierzchni przypadającej na określoną funk- cję w habitacie HERA	108
5.21	Habitat Halley VI, źródło: [134].....	109
5.22	Habitat Halley VI, źródło: [134].....	109
5.23	Habitat Halley VI, źródło: [134].....	110
5.24	Habitat Halley VI, źródło: [134].....	110
5.25	Ilustracja graficzna powierzchni przypadającej na określoną funk- cję w habitacie Halley VI	113
5.26	Habitat HI-SEAS, źródło: [138].....	114
5.27	Habitat HI-SEAS, źródło: [138].....	114
5.28	Habitat HI-SEAS. Funkcje pomieszczeń, źródło: [138]	114
5.29	Graficzna prezentacja przestrzeni przypadającej na poszczególne funkcje habitatu HI-SEAS.....	117
5.30	Habitat Lunar Palace 1, źródło: [145]	118
5.31	Habitat Lunar Palace 1, źródło: [145]	118

5.32	prezentacja graficzna powierzchni przypadającej na określona funkcję w Lunar Palace 1	120
5.33	Habitat SHEE, źródło: [149]	122
5.34	Habitat SHEE, źródło: [149]	122
5.35	Ilustracja graficzna powierzchni przypadającej na określone funkcje	124
5.36	Habitat HESTIA, źródło:[150]	125
5.37	Habitat HESTIA, rozkład pomieszczeń, źródło: [150]	126
5.38	Ilustracja graficzna powierzchni przypadającej na określone funkcje w habitacie HESTIA	129
5.39	Habitat MEERS, źródło: [155]	130
5.40	Habitat MEERS, źródło: [155]	130
5.41	Ilustracja graficzna powierzchni przypadającej na określone funkcje w habitacie MEERS	132
5.42	Habitat LunAres, prace własne	133
5.43	Habitat LunAres, prace własne	134
5.44	Habitat LunAres, prace własne	134
5.45	Habitat LunAres. Projekt pod kierownictwem autora.	134
5.46	Ilustracja graficzna powierzchni przypadającej na określone funkcje w habitacie LunAres	137
5.47	Habitat ILMH, źródło: [162]	138
5.48	Habitat ILMH, źródło: [162]	138
5.49	Ilustracja graficzna powierzchni przypadającej na określone funkcje w habitacie ILMH	140
5.50	habitat ExoHab, źródło: [169]	141
5.51	Habitat ExoHab, źródło: [169]	141
5.52	Ilustracja graficzna powierzchni przypadającej na określone funkcje habitatu ExoHab	143
5.53	Kepler Station, źródło: [175]	144
5.54	Kepler Station, źródło: [175]	144
5.55	Kepler Station, źródło: [175]	144
5.56	Habitat D-Mars, źródło: [175]	146
5.57	Habitat D-Mars, źródło: [175]	147
5.58	Ilustracja graficzna powierzchni przypadającej na określone funkcje dla habitatu D-Mars	149
5.59	Habitat EDEN-ISS, źródło: [149]	150
5.60	Habitat EDEN-ISS, źródło: [149]	150
5.61	Ilustracja graficzna powierzchni przypadającej na określone funkcje w habitacie EDEN ISS	152
5.62	Habitat CELLS, źródło: [184]	153
5.63	Habitat CELLS, źródło:[184]	154
5.64	Ilustracja graficzna powierzchni przypadającej na określone funkcje habitatu CELLS	156
5.65	Habitat MAMBA, zdjęcie udostępnione przez dr Ch.Henicke	158
5.66	Habitat MAMBA, wizualizacja autora	158
5.67	Habitat MAMBA, wizualizacja autora	158
5.68	Habitat MAMBA. Wizualizacja pomieszczeń, wizualizacja autora	159

5.69	Ilustracja graficzna powierzchni przypadającej na określone funkcje habitatu MaMBA, Moduł No1	161
5.70	Habitat LUNARK, źródło: [197]	162
5.71	Habitat LUNARK, źródło: [197]	163
5.72	Ilustracja graficzna powierzchni przypadającej na określone funkcje habitatu LUNARK	165
5.73	Habitat Hydronaut H03 DeepLab, źródło: [200]	166
5.74	Ilustracja graficzna powierzchni przypadającej na określone funkcje habitatu Hydronaut DeepLab	168
5.75	Habitat Flexhab i Luna, źródło: [201]	169
5.76	Habitat Flexhab i Luna, źródło: [201]	169
5.77	Luna i Flexhab, ilustracja graficzna powierzchni przypadającej na określone funkcje	171
5.78	Habitat Mars Dune Alpha. Widok i plan wnętrza, źródło: [205] .	172
5.79	Ilustracja graficzna powierzchni przypadającej na określone funkcje w habitacie MDA.	174
5.80	Habitat SAM i hala do symulacji EVA, źródło: [206]	175
5.81	Ilustracja graficzna powierzchni przypadającej na określone funkcje habitatu SAM.	177
6.1	Lata powstania AHK (opracowanie własne)	178
6.2	Lokalizacja AHK (opracowanie własne)	179
6.3	Typy architektury kosmicznej AHK (opracowanie własne).	181
6.4	Sytemy konstrukcyjne AHK (opracowanie własne)	182
6.5	Zastosowanie technologii Spin-in/ Spin-off AHK (opracowanie własne)	183
6.6	Poziom gotowości do zamieszkania AHK (opracowanie własne)	184
6.7	Poziom gotowości technologicznej TRL analogowych habitatów badawczych (opracowanie własne).	185
6.8	Technologiczny poziom wierności AHK (opracowanie własne).	186
6.9	Liczba członków załogi (opracowanie własne)	187
6.10	Liczba misji (opracowanie własne)	187
6.11	Średnia długość misji (dni), (opracowanie własne)	188
6.12	Operacyjny poziom wierności AHK (opracowanie własne)	189
6.13	Cechy naukowe AHK (opracowanie własne).	190
6.14	Liczba publikacji naukowych AHK (opracowanie własne)	191
6.15	Poziom wierności naukowej AHK (opracowanie własne)	191
6.16	Powierzchnia całkowita AHK (opracowanie własne)	192
6.17	Powierzchnia na osobę AHK (opracowanie własne)	193
6.18	Kubatura w funkcji powierzchni AHK na 1 osobę (opracowanie własne).	194
6.19	Kubatura całkowita AHK (opracowanie własne).	194
6.20	Kubatura AHK na jedną osobę (opracowanie własne)	195
6.21	Kubatura AHK w funkcji powierzchni (opracowanie własne)	195
6.22	Procent powierzchni AHK przeznaczonej na określone funkcje (opracowanie własne)	196
6.23	Typ logistyczny AHK (opracowanie własne).	197

6.24	Forma przestrzenna AHK. Niektóre AHK wykorzystują więcej niż jedna formę przestrzenną. (Opracowanie własne).....	198
6.25	Forma geometryczna AHK. Niektóre AHK wykorzystują więcej niż jedna formę geometryczną. (Opracowanie własne).....	198
6.26	Układ przestrzenny AHK (opracowanie własne).....	199
6.27	Najważniejsze cechy charakterystyczne AHK symulacyjnych (opracowanie własne).....	201
6.28	Najważniejsze cechy charakterystyczne AHK prototypowych (opracowanie własne).....	203
6.29	Najważniejsze cechy charakterystyczne AHK biotechnologicznych (opracowanie własne).	204
6.30	Najważniejsze cechy dotyczące AHK adaptowanych (opracowanie własne).....	205

Spis tabel

1.1	Inżynierskie i architektoniczne podejścia do projektowania, źródło: [54]	31
5.1	Dane dotyczące Bios-3a	83
5.2	Dane dotyczące habitatu Bios-3 – ciąg dalszy. Oznaczenia użyte w tabeli: A – powierzchnia, V – objętość, L – długość, W – szerokość, H – wysokość. Takie samo jest znaczenie wymienionych symboli w pozostałych tabelach obecnego rozdziału	84
5.3	Dane dotyczące Aquarius Reef Base	87
5.4	Aquarius Reef Base – część dalsza tabeli	88
5.5	Dane dotyczące FMARS.....	90
5.6	dane dotyczące habitatu FMARS – kontynuacja tabeli.....	91
5.7	Dane dotyczące MDRS.....	94
5.8	Dane dotyczące MDRS – część dalsza tabeli.....	95
5.9	Dane dotyczące Stacji Concordia	98
5.10	Stacja Concordia – dalsza część danych.....	99
5.11	Dane dotyczące IBMP	102
5.12	Dane dotyczące IBMP, część dalsza tabeli	103
5.13	Dane dotyczące habitatu Hera	106
5.14	Dane dotyczące habitatu Hera – ciąg dalszy	107
5.15	Dane dotyczące Halley-VI.....	111
5.16	Dane dotyczące habitatu Halley VI – ciąg dalszy	112
5.17	Dane dotyczące Hi-SEAS.....	115
5.18	Dane dotyczące HI-SEAS – część dalsza tabeli.....	116
5.19	Dane dotyczące LunarPalace.....	119
5.20	Lunar Palace 1.....	120
5.21	Dane dotyczące habitatu SHEE	123
5.22	dane dotyczące habitatu SHEE- dalsza część tabeli	124
5.23	Dane dotyczące habitatu HESTIA	127
5.24	Dane dotyczące habitatu HESTIA – ciąg dalszy	128
5.25	Dane dotyczące habitatu MEERS	131
5.26	Dane dotyczące habitatu MEERS – ciąg dalszy.....	132
5.27	Dane dotyczące habitatu LunAres.....	135
5.28	Dane dotyczące habitatu LunAres – część dalsza tabeli	136
5.29	Dane dotyczące habitatu ILMH.....	139
5.30	Dane dotyczące habitatu ILMH- część dalsza	140
5.31	Dane dotyczące habitatu ExoHab.....	142

5.32	Dane dotyczące habitatu ExoHab. Dalsza część tabeli.....	143
5.33	Dane dotyczące stacji Kepler.....	145
5.34	Dane dotyczące habitatu D-Mars	148
5.35	Dane dotyczące habitatu D-Mars. Dalsza część tabeli.....	149
5.36	Dane dotyczące habitatu EDEN ISS	151
5.37	Dane dotyczące habitatu EDEN ISS - dalsza część tabeli	152
5.38	Dane dotyczące habitatu CELSS	155
5.39	Dane dotyczące habitatu CELSS, dalsza część tabeli.....	156
5.40	Dane dotyczące habitatu MAMBA	160
5.41	Dane dotyczące habitatu MAMBA. Moduł No1	161
5.42	Dane dotyczące habitatu LunArk	164
5.43	Dane dotyczące habitatu LunArk, dalsza część tabeli.....	165
5.44	Dane dotyczące habitatu Hydronaut DeepLab.....	167
5.45	Dane dotyczące habitatu Hydronaut DeepLab, dalsza część tabeli	168
5.46	Dane dotyczące habitatu Flexhab.....	170
5.47	Dane dotyczące habitatu Luna i Flexhab	171
5.48	Dane dotyczące habitatu MDA	173
5.49	Dane dla Mars Dune Alpha, dalsza część tabeli	174
5.50	Dane dotyczące habitatu SAM	176
5.51	Dane dotyczące habitatu SAM, dalsza część tabeli	177

Bibliografia

- [1] Ciołkowski K., "The Exploration of Cosmic Space by Means of Reaction Devices (Исследование мировых пространств реактивными приборами), 1903.
- [2] Potočnik H. Das Problem der Befahrung des Weltraums - der Raketen- Motor, W: R. C. Schmidt, 1929, ISBN 978-961-92999-3-7
- [3] Potočnik H. Das Problem der Befahrung des Weltraums - der Raketen- Motor, W: R. C. Schmidt, 1929, ISBN 978-961-92999-3-7
- [4] Life Magazine. (1945, lipiec 23). "German Space Mirror." Dostęp: 1 grudnia 2023, z <https://books.google.pl/books?id=30kEAAAAMBAJ&pg=PA78>
- [5] Dugan T. V-2: A Combat History of the First Ballistic Missile. Westholme Publishing 2005. ISBN: 1-59416-012-0.
- [6] West J.B. "Historical aspects of the early Soviet/ Russian crewed space program". W: Journal of Applied Physiology (2001), s. 1501-1511. doi: doi:10.1152/jappl.2001.91.4.1501.PMID11568130..
- [7] Jacobsen A. Operation Paperclip: The Secret Intelligence Program to Bring Nazi Scientists to America. New York: Little, Brown i Company, 2014. ISBN: 978-0-316-22105-4.
- [8] Houghton J. "Global Warming". W: Rep. Prog. Phys. (2005), s. 1343. doi: dx.doi.org/.org/10.1088/0034-4885/68/6/R02.
- [9] [url:https://www.nasa.gov/international-space-station/space-station-gallery/](https://www.nasa.gov/international-space-station/space-station-gallery/). Dostęp 1.12.2023
- [10] [url:http://spaceflight.nasa.gov/gallery/images/station/crew-24/hires/iss024e014263.jpg](http://spaceflight.nasa.gov/gallery/images/station/crew-24/hires/iss024e014263.jpg). Dostęp 1.12.2023
- [11] Connolly J. Daues K. Howard R. Jr Toups L. "Definition and Development of Habitation Readiness Level (HRLs) for Planetary Surface Habitats". W: (2006), s. 1-8. doi: doi:10.1061/40830(188)81..
- [12] [url:https://en.wikipedia.org/wiki/Super_heavy_lift_launch_vehicle#/media/File:Maximum_Payload.PNG](https://en.wikipedia.org/wiki/Super_heavy_lift_launch_vehicle#/media/File:Maximum_Payload.PNG). Dostęp 1.12.2023
- [13] [url:https://www.esa.int/About_Us/EAC/Luna_facility_brings_Moon_to_Earth](https://www.esa.int/About_Us/EAC/Luna_facility_brings_Moon_to_Earth). Dostęp 1.12.2023
- [14] [url:www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2013/01/Multi-dome_base_being_constructed](http://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2013/01/Multi-dome_base_being_constructed). Dostęp 1.12.2023
- [15] [url:https://www.nasa.gov/wpcontent/uploads/2019/05/america_to_the_moon_2024_artemis_20190523.pdf](https://www.nasa.gov/wpcontent/uploads/2019/05/america_to_the_moon_2024_artemis_20190523.pdf). Dostęp 1.12.2023

- [16] url: https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Lunar_Gateway_Earth_s_guard_post_against_asteroids. Dostęp 1.12.2023
- [17] url: <https://www.nasa.gov/humans-in-space/nasa-selects-blue-origin-dynetics-spacex-for-artemis-human-landers/>. Dostęp 1.12.2023
- [18] "NASA's management of the Artemis missions". W: 2021, Report No. IG- 22-003 November 15.
- [19] Encyclopaedia Britannica. Encyclopædia Britannica, Inc., 1961.
- [20] Kostof S. A. „History of Architecture”. 1995. ISBN: 9780195083798.
- [21] Howe S. Sherwood B. The New Field of Space Architecture. 2009. ISBN: 978-1-56347-982-3 e 978-1-56347-987-8.
- [22] url:<https://www.universetoday.com/146399/what-does-it-mean-to-be-a-space-architect/>. Dostęp 1.12.2023
- [23] Yaden D. B. Iwry J. Slack K. J. Eichstaedt J. C. Zhao Y. Vaillant G. E. Newberg A. B. "The overview effect: Awe and self-transcendent experience in space flight." W: Psychology of Consciousness: Theory, Research, and Practice (2016), s. 41275.
- [24] url: <https://www.scientificamerican.com/article/astronomical-unit-or-earth-sun-distance-gets-an-overhaul/>. Dostęp 1.12.2023
- [25] Dicello J.F. Cucinotta F.A. Encyclopedia of Space Science and Technology, H. Mark (Ed.) 2003.
- [26] Feynman R. Leighton R. Sands M. The Feynman Lectures on Physics. Library of Congress Catalog Card No. 63-20717, 1964. ISBN: 0-201-02115- 3.
- [27] Jakosky B.M. Grebowsky J.M. et al. "MAVEN observations of the response of Mars to an interplanetary coronal mass ejection". W: Science (2015), aad0210-1. doi: doi.org/83k.
- [28] url: <https://www.britannica.com>. Dostęp 1.12.2023
- [29] Bertaux J.L. Vandaele A.C. Korablev O. at al. "A warm layer in Venus' cryosphere and high-altitude measurements of HF, HCl, H2O and HDO". W: Nature (2007), s. 7170. doi: doi : 10 . 1038 / nature05974 . PMID : 18046397..
- [30] Khavrus V. Shelevytsky I. "Geometry and the physics of seasons". W: Physics Education (2012), s. 680-692. doi: doi:10.1088/0031-9120/47/ 6/680.
- [31] a Siddiqi A. Sputnik and the Soviet Space Challenge. 2003. ISBN: 10 : 081302627X.
- [32] Burgess C. The First Soviet Cosmonaut Team. 2009. ISBN: ASIN : B00XV4406C.
- [33] url: https://en.wikipedia.org/wiki/Vostok_%28spacecraft%29#/media/File:Vostok_spacecraft.jpg. Dostęp 1.12.2023
- [34] url: <http://History.NASA.gov>. Dostęp 1.12.2023

- [35] Alexander C.C. Grimwood J.M. Swenson L.S. *This New Ocean: a History of Project Mercury*. US: NASA, 1966.
- [36] url: <https://www.npr.org/sections/krulwich/2011/05/02/134597833/cosmonaut-crashed-into-earth-crying-in-rage>.
Dostęp 1.12.2023
- [37] url: <https://www.nasa.gov/learning-resources/for-kids-and-students/what-is-the-soyuz-spacecraft-grades-k-4/>.
Dostęp 1.12.2023
- [38] Meuser P. Galina Balashova. *Architect of the Soviet Space Programme*. 2015. ISBN: 10 : 3869223553.
- [39] Brooks C.G. Grimwood-Loyd J.M. Swenson S. *Chariots for Apollo: A History of Manned Lunar Spacecraft*. NASA, 1979. ISBN: 0-486-46756-2.
- [40] Ertel I.D. Newkirk R.W. et al. *The Apollo Spacecraft: A Chronology*. Vol. IV. Washington, D.C.: NASA. LCCN 69060008. OCLC 23818. NASA SP-4009, 1967.
- [41] Orloff R. *Apollo by the Numbers*. National Aeronautics i Space Administration.
- [42] Ivanovich G.S. *Salyut - The First Space Station: Triumph and Tragedy*. Springer Praxis Books / Space Exploration, 2008.
- [43] url: <https://www.nytimes.com/1991/02/07/world/salyut-7-soviet-station-in-space-falls-to-earth-after-9-year-orbit.html>.
Dostęp 1.12.2023
- [44] Belew L.F. NASA Scientific and Technical Information Office. OCLC 2644423. SP-400. 1977.
- [45] Harvey B. *The Rebirth of the Russian Space Programme: 50 Years After Sputnik*. New Frontiers. Springer. ISBN: 978-0-38-771356-.
- [46] Hall R. *The History of Mir 1986-2000*. 2000. ISBN: 10 : 0950659746.
- [47] Manzey D. Lorenz B. Poljakov V. "Mental Performance in extreme environments: Results from a performance monitoring study during a 438- day spaceflight". W: *Ergonomics* (1998), s. 537-59. doi: doi:10.1080/001401398186991..
- [48] O'Neill G.K. *The High Frontier: Human Colonies In Space*. ISBN: 10:1686872720.
- [49] Kitmacher G.H. *Reference Guide to the International Space Station*. ISBN: 10:1480265349.
- [50] url: www.spacearchitect.com. Dostęp 1.12.2023
- [51] url: <https://www.blueorigin.com/news/orbital-reef-commercial-space-station>. Dostęp 1.12.2023
- [52] url: <https://liquifer.com/>. Dostęp 1.12.2023
- [53] url: <https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/space/press-release/thales-alenia-space-its-way-reach-moon>. Dostęp 1.12.2023
- [54] Häuplik-Meusburger S. Bannova O. *Space Architecture Education for Engineers and Architects: Designing and Planning Beyond Earth*. 2016. ISBN: 10 : 9783319192789.

- [55] Schlacht I.L Foing B Bananova O. Blok F. Mangeot A. Nebergall K. Ono A. Schubert D. "Existing and new proposals of Space analog, off-grid and sustainable habitats with Space applications". W: 2016.
- [56] Oberth H. Die Rakete zu den Planetenräumen. R. Oldenbourg, München, 1923. ISBN: 978-3486741872
- [57] Hoffman S. J. Love S.G. Human Exploration of Mars Design Reference Architecture 5.0 Addendum #2 W: 2015. Rozd. 11, s. 429-480.
- [58] Catchpole J. Project Mercury: NASA's First Manned Space Programme. 2001. ISBN: 9781852334062.
- [59] url: <https://www.businessinsider.com/55th-anniversary-of-mercury-seven-astronauts-2014-4?IR=T>. Dostęp 1.12.2023
- [60] url: <https://www.nasa.gov/image-article/original-mercury-seven-during-survival-training/>. Dostęp 1.12.2023
- [61] url: https://seawifs.gsfc.nasa.gov/FRANKLIN/HTML/image_archive.html
Dostęp 1.12.2023
- [62] Petersen J. Haberstock A. Siccama T. Vogt K. Vogt D. Tusting B. 1992.
doi: 10.158-168.10.3368/er.10.2.158..
- [63] Tikhomirov A. Ushakova S. Kovaleva N. Lamaze B. Lobo M. Lasseur C. "Biological life support systems for a Mars mission planetary base: Problems and prospects". W: Advances in Space Research (2007), s. 1741- 1745. doi:40.1741-1745.10.1016/j.asr.2006.11.009..
- [64] Złoczewski K. Poznań, Kosmos. PW-Sat2. T. 85.Amermedia, s. 4-8, 2013, ISBN: 978-83-252-2125-6.
- [65] url: <https://kosmonauta.net/2021/02/deorbitacja-pw-sat2/>. Dostęp 1.12.2023
- [66] url: <https://www.protectivepackaging.net/protective-packaging-packages-rocket-fairing-for-transport>. Dostęp 1.12.2023
url: https://www.reddit.com/r/SpaceXLounge/comments/i9viok/americas_fairings_20_with_way_more_details/ Dostęp 1.12.2023
- [67] Ralph R. NASA Space Mission Architecture Framework, NASA-HDBK-1005, 2021
- [68] Zubrin R. Wagner R. Clarke A. Free Press., 1996. ISBN: 684835509.
- [69] Hoffman S.J. (Editor David I. Kaplan). Reference Mission Version 3.0, NASA-SP6107, 1997.
- [70] Cooke D.R. „Human Exploration of Mars Design Reference Architecture 4.0”. 2000.
- [71] Hoffman S. J. Human Exploration of Mars Design Reference Architecture 5.0., 2009.
- [72] Davis J.R. Johnson R. Stepanek J. Lippincott Williams Wilkins, Philadelphia PA, USA, 2008.
- [73] Duri L. El-Nakhel C. Caporale A.G. Ciriello M. Graziani G. Pannico A. Palladino M. Ritieni A. De Pascale S. Vingiani. "Mars Regolith Simulant Ameliorated by Compost as in situ Cultivation Substrate Improves Lettuce Growth and Nutritional Aspects". W: Plants 9 (2020), s. 628. doi: doi. org/10.3390/plants9050628.
- [74] Massa G. Dufour N. Carver J. Hummerick M. Wheeler R. Morrow R. Smith T. M. "VEG-01: Veggie Hardware Validation Testing on the International Space Station". W: Open Agriculture. 2 (2017). doi: doi : 10.1515/opag-2017-0003..

- [75] Lasseur C. "Melissa: The European project of a closed life support system". W: 2006.
- [76] Blaber E. Helder M. Brendan B. "Bioastronautics: The Influence of Micro-gravity on Astronaut Health". W: *Astrobiology* (2010), s. 463–73. doi: doi:10.1089/ast.2009.0415..
- [77] Mrigakshi A. I. Matthiä D. Berger T. Reitz G. Wimmer-Schweingruber R. F. "Assessment of galactic cosmic ray models". W: *J. Geophys. Res.* (2012), A08109. doi: doi:10.1029/2012JA017611..
- [78] Chancellor JC Scott G.B. Sutton J.P. "Space Radiation: The Number One Risk to Astronaut Health beyond Low Earth Orbit". W: *Life (Basel)* (2014), s. 491–510. doi: 10.3390/life4030491..
- [79] Shaowen H. "Solar Particle Events and Radiation Exposure in Space". W: *The Health Risks of Extraterrestrial Environments (THREE)* (2017).
- [80] Sinclair WK. "Dose limits for astronauts". W: *Health Phys.* (2000), s. 585–90. doi: doi:10.1097/00004032-200011000-00017.
- [81] Märki A. "Radiation Analysis for Moon and Mars Missions". W: *International Journal of Astrophysics and Space Science* (2020), s. 16–26. doi: 10.11648/j.ijass.20200803.11.
- [82] Khan-Mayberry N. "The Lunar environment: Determining the health effects of exposure to moon dusts". W: *Acta Astronautica – ACTA ASTRO-NAUT* (2008), s. 1006–1014. doi: 10.1016/j.actaastro.2008.03.015..
- [83] Alfonso D. Willson D. Coates J. McKay Ch. "Perchlorate on Mars: A chemical hazard and a resource for humans". W: *International Journal of Astrobiology* (2013). doi: 10.1017/S1473550413000189..
- [84] Marshall-Goebel K. Damani R. Bershad EM. "Brain Physiological Response and Adaptation During Spaceflight". W: *Neurosurgery* (2019), E815–E821. doi: doi:10.1093/neuros/nyz203.
- [85] url: <https://spacenews.com/beam-module-fully-expanded-on-space-station/>. Dostęp 1.12.2023
- [86] url: <https://www.iconbuild.com/projects/mars-dune-alpha>. Dostęp 1.12.2023
- [87] Rothschild L.J. "NASA Ames Research Center Myco-architecture off planet: growing surface structures at destination NIAC 2018 Phase I. Final Report". W: 2018.
- [88] url: <https://www.nasa.gov/general/myco-architecture-off-planet-growing-surface-structures-at-destination/> Dostęp 1.12.2023
- [89] De Angelis G. Wilson J.W. Cloudsley M.S. Nealy J.E. Humes D.H. Clem J.M. "Lunar lava tube radiation safety analysis". W: *J. Radiat Res.* (2002), S41–5. doi: 10.1269/jrr.43.s41.PMID:12793728..
- [90] Mankins J. "Technology Readiness Level – A White Paper." W: (1995).
- [91] Cohen M. "Mockups 101: Code and Standard Research for Space Habitat Analogues". W: (2012). doi: 10.2514/6.2012-5153..

- [92] Simpson M. "Spin-Out and Spin-In in the Newest Space Age". W: Michael Simpson, Ph.D., 2010. All Rights Reserved, 2010.
- [93] Liskowsky D.R. Human Integration Design Handbook (Hidh). Nasa/Sp-2010-3407/Rev1, 2010.
- [94] Liskowsky D.R. Human Integration Design Handbook (Hidh). Nasa/Sp-2010-3407/Rev1, 2010.
- [95] Nasa Space Flight Human-System Standard:Nasa-Std-3001, Volume 1, Revision B., 2022
- [96] Salisbury F.B. Gitelson I.I. Genry M. Lisovsky G.M. "Bios-3 - siberian experiments in bioregenerative life support". W: BioScience (1997), s. 575- 585.
- [97] Gitelson I.I. Terskov I.A. Kovrov B.G. Lisovskii G.M. Okladnikov Yu.N. Sidko F. Ya. Trubachev I.N. Shilenko M.P. Alekseev S.S. Pankova I.M. Tirranen L.S. "Long-term experiments on man's stay in biological life-support system". W: (1989).
- [98] url: <https://environment.fiu.edu/aquarius/> . Dostęp 1.12.2023
- [99] Chappell S.P. Abercromby R.F. Michael L. Gernhardt M.L. "NEEMO 15: Evaluation of human exploration systems for nearearth asteroids". W: Acta Astronautica (2013), s. 166-178. doi: doi.org/10.1016/j.actaastro.2013.03.002.
- [100] K.P. Sebens K.P. Bernardi G. Patterson M.R. Burkepile D. "Saturation diving and underwater laboratories: How underwater technology has aided research on coral biology and reef ecology". W: Smithsonian Contributions to the Marine Sciences (2013), s. 39-52.
- [101] url: <http://fmars.marssociety.org/> . Dostęp 1.12.2023
- [102] Bamsey M. Berinstain A. Auclair S. Battler M. Binsted K. Bywaters K. Harris J. Kobrick R. McKay C. "Four-month moon and mars crew water utilization study conducted at the flashline mars arctic research station, Devon island, Nunavut". W: Advances in Space Research (2009), s. 1256- 1274.
- [103] url: <https://ntrs.nasa.gov/> . Dostęp 1.12.2023
- [104] Bishop S.L. Kobrick R. Battler M. Binsted K. "FMARS 2007: Stress and coping in an arctic Mars simulation". W: Acta Astronautica (2010), s. 1353-1367. doi: doi:10.1016/j.actaastro.2009.11.008.
- [105] url: <http://fmars.marssociety.org/> . Dostęp 1.12.2023
- [106] Sawyer B.D. Hancock P.A. Deaton J. Suedfeld P. "Finding the team for Mars: a psychological and human factors analysis of a Mars Desert Research Station". W: Work. 2012,41 (2012), s. 5481-4. doi: doi:10.3233/ WOR-2012-0859-5481.
- [107] Souchier A. "Private ground infrastructures for space exploration missions simulations". W: Acta Astronautica (2010), s. 1580-1592.
- [108] Thiel C.S. Pletser V. Foing B. "Human crew-related aspects for astrobiology research". W: International Journal of Astrobiology (2011), s. 255-267. doi: doi:10.1017/S1473550411000152.

- [109] Pell S.J. Kobrick R. Barnes D. "Human Spaceflight Performance: Bootstrapping the intersection of Biometrics and Artistic Expression through planetary mission analogue EVAs.." W: (2019).
- [110] Oguz E. Kubicek M. Clelland D. "Failure modes and criticality analysis of the preliminary design phase of the Mars Desert Research Station considering human factors. Reliability Engineering System Safety" . W: (2018). doi: doi:178.10.1016/j.res.2018.06.023..
- [111] Sawyer BD Hancock PA Deaton J Suedfeld P. 2012. doi: 10.3233/WOR-2012-0859-5481.
- [112] Oguz E. Kubicek M. Clelland D. "Failure modes and criticality analysis of the preliminary design phase of the Mars Desert Research Station considering human factors. Reliability Engineering System Safety" . W: (2018). doi: doi:178.10.1016/j.res.2018.06.023..
- [113] Mekarnia D. Frenot Y. "The French-Italian Concordia station" . W: 2012, s. 178-185.
- [114] Tin T. Sovacool B. Blake D. Magill P. El Naggar S. Lidstrom S. Ishizawa K. Berte J. "Energy efficiency and renewable energy under extreme conditions: Case studies from Antarctica" . W: Renewable Energy (2010), s. 1715-1723. doi: doi.org/10.1016/j.renene.2009.10.020.
- [115] url: <https://blogs.esa.int/concordia/2014/01/17/concordia-living-on-white-mars/> . Dostęp 1.12.2023
- [116] Van Ombergen A. Rossiter R. Ngo-Anh Thu. "White Mars" - nearly two decades of biomedical research at the Antarctic Concordia station" . W: Experimental Physiology (2020). doi: doi:10.1113/ep088352..
- [117] Ulrich N. Moissl-Eichinger Ch. van den Berg F. Probst A. Moeller R. 2018.
- [118] Gábor K. Vicsi K. "Follow-up Psychological Status Monitoring of the Crew Members of Concordia Research Station at Antarctica Based on their Speech." W: (2017).
- [119] Bessone L. Anniciello L Coffey E. Klein N. 2007. doi: doi:10.13140/2.1.4105.4085..
- [120] url: <http://www.concordiastation.aq/> . Dostęp 1.12.2023
- [121] Roesch J. "Work Design of Mars Surface Activities using Socio-technical Principles." W: (2008). doi: doi:10.13140/RG.2.2.35993.21608..
- [122] Schwendner P. "Microbial ecology of the MARS 500 habitat. Tafforin, Carole. (2013). The Mars-500 crew in daily life activities: An ethological study" . W: Acta Astronautica (2014), s. 69-76. doi: doi: 10 . 1016 /j. actaastro.2013.05.001..
- [123] Arbeille P. Provost R. Vincent N. Aubert R. "Adaptation of the Main Peripheral Artery and Vein to Long Term Confinement (MARS 500)" . W: PloS one (2014), e83063. doi: doi:10.1371/journal.pone.0083063.
- [124] Remuss N. Schrogl K. Worms J. "The Mars 500 isolation experiment." W: (2011). doi: doi:10.1007/978-3-7091-0280-0_27..

- [125] url: https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Mars500.
- [126] url: http://mars500.imbp.ru/en/index_e.html. Dostęp 1.12.2023
- [127] Scott A. H. Kennedy K.J. Gill T.R. Smith R.W. George P. "NASA Habitat Demonstration Unit (HDU) Deep Space Habitat Analog". W: (2013), s. 20150007877.
- [128] Kennedy K. "NASA Habitat Demonstration Unit Project - Deep Space Habitat Overview". W: 2011. doi: doi:10.2514/6.2011-5020..
- [129] Barbeau Z. 2011.
- [130] Gill T. Kennedy K. Tri T. Howe A. "The Habitat Demonstration Unit System Integration". W: (2010). doi: 10.1061/41096(366)133..
- [131] Blake D. "The Construction of Halley VI Station in Antarctica". W: (2013), s. 59-66. doi: doi:10.1061/9780784412978.006..
- [132] Spencer A. "Imaginarities of planetary inhabitation: Polar futurism and the labors of climate science". W: Environment and Planning E: Nature and Space (2022). doi: doi:10.1177/25148486221129124..
- [133] url: <https://hbarchitects.co.uk/>. Dostęp 1.12.2023
- [134] url: <https://www.hi-seas.org/>. Dostęp 1.12.2023
- [135] Hauptlik-Meusburger S. Binsted K. Bassingthwaighte T. Petrov G. "Habitability studies and full scale simulation research: Preliminary themes following hiseas mission iv, 16-20 July 2017." W: 2017.
- [136] Ehrlich J.W. Massa G. Wheeler R. Gill T.R. Quincy Ch. Roberson L. Binsted K. Morrow R. "Plant growth optimization by vegetable production system in hi-seas analog habitat". W: American Institute of Aeronautics i Astronautics., 2017, s. 141.
- [137] url: <https://www.hi-seas.org/>. Dostęp 1.12.2023
- [138] Chen D. Yuming F. Beizhen X. Minjuan W. Hong L. "Element cycling and energy flux responses in ecosystem simulations conducted at the Chinese Lunar Palace1". W: Astrobiology (2017), s. 78-86. doi: doi: 10.1089/ast.2016.1466.
- [139] Yuming F. Y. Leyuan L. Beizhen X. Chen D. Mingjuan W. et al. "How to establish a bioregenerative life support system for long-term crewed missions to the moon or Mars". W: Astrobiology (2016), s. 925-936. doi: doi:10.1089/ast.2016.1477.
- [140] Chen D. Guanghui L. Yuming F. Minjuan W. Beizhen X. Youcai Q. Bowei L. Hong L. "Twin studies in chinese closed controlled ecosystem with humans: The effect of elevated co2 disturbance on gas exchange characteristics". W: Ecological Engineering (2016), s. 126-130.
- [141] Ruilin W. Ya W. "Psychosocial interaction during a 105-day isolated mission in Lunar Palace 1". W: Acta Astronautica (2015), s. 1-7.

- [142] Chen D. Lingzhi S. Yuming F. Minjuan W. Beizhen X. Juan Y. Hong L. "Evaluation of wheat growth, morphological characteristics, biomass yield and quality in lunar palace-1, plant factory, green house and field systems." W: *Acta Astronautica* (2015), s. 102-109.
- [143] Guanghui L. Yingying D. Beizhen X. Dawei H. Yuming F. Chen D. Liang L. Hong L. "The regulation of co₂ levels in a blss by controlling the solid waste treatment unit". W: *Ecological Engineering* (2016), s. 382-386. doi: doi:10.1016/j.ecoleng.2016.01.048.
- [144] url:<https://www.space.com/40610-china-mock-moon-mission-lunar-palace-1-photos.html>.
- [145] Weiss P. Gradette B. Taillebot V. Gobert T. Osborne B. Nelson J. Imhof B. Hoheneder W. Ransom S. Waclavicek R. Gancet J. Urbina D. Aabloo A. Kull P. Sevick . Gajdos P. Vajdak M. Doule O. "The SHEE project self-deployable habitat for extreme environment test-bed for analog simulations." W: (2014).
- [146] Imhof B. Nelson J. Madakashira H.K. Aabloo A. Weiss P. "Shee - a self-deployable habitat for extreme environments: Exploitation and lessons learnt from testing, 10-14 July". W: 2016.
- [147] Doule O. Imhof B. "Self-deployable habitat for extreme environments - universal platform for analog research". W: Reston, Virginia, 08042014. American Institute of Aeronautics i Astronautics., 2014, s. 2.
- [148] url: <https://liquifer.com/>. Dostęp 1.12.2023
- [149] url: <https://www.nasa.gov/analogs/hestia/facilities>. Dostęp 1.12.2023
- [150] url: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20160005082>. Dostęp 1.12.2023
- [151] url: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20160005875>. Dostęp 1.12.2023
- [152] Kitmanyen V.A. Disher T.J. Kobrick R.L. Kring J.P. "Human factors for small net habitable volume: The case for a close-quarter space habitat analog". W: 2017.
- [153] Munoz G. Fehlinger M. Kring J. "Designing for Mars: Mitigating habitability factors to support crew performance". W: 2013, s. 1392-1394.
- [154] url:<https://www.americaspace.com/2016/01/12/embry-riddle-mobile-space-habitat-enables-students-to-conduct-research-and-experiments-in-extreme-environments/>. Dostęp 1.12.2023
- [155] Mintus A. Orzechowski L. Ćwilichowska N. "LunAres Analog Research Station - Overview of updated design and research potential". W: *Acta Astronautica* (2022), s. 785-794.
- [156] Mintus A. Orzechowski L. Jurga J. Cwilichowska N. "Design of hygiene module using closed grey water cycle for LunAres Research Station -main assumptions and applications." W: 2020.
- [157] Orzechowski L. Mintus A. Waśniowski A. Ćwilichowska N. "Gender Parity and Parastronauts: Anticipating trends for the 2021 ESA astronaut selection criterion with analog mission studies". W: 2021.

- [158] Gronwald B. Kijak K. Baszuk P. Lietz-Kijak D. Kosko K. Matuszczak M. Skomro P. Bielawska-Victorini H. Orzechowski L. Mintus A. Gronwald H. "Evaluation of Physiotherapy Impact on Neuromuscular Tension in Analog Astronauts at the LunAres Habitat". W: *International Journal of Environmental Research and Public Health* (2022), s. 6888. doi: doi: 10.3390/ijerph19116888..
- [159] Rub I. Matraszek M. Konorski P. Perycz M. Waśniowski A. r Batorski D. Iwanicki K. 2019. doi:10.1109/ICDCS.2019.00169..
- [160] Jurga J. rozprawa doktorska ASP, Gdańsk, 2021. 2021.
- [161] Swarmer T. Anderson L. de Leon P. "Performance review of a pressurized inflatable lunar habitat integrated with an electric rover and pressurized analog planetary suits during an initial ten day simulation". W: 2014.
- [162] url: <http://spacesuitlab.blogspot.com/>. Dostęp 1.12.2023
- [163] url: <http://spacesuitlab.blogspot.com/>. Dostęp 1.12.2023
- [164] Blachowicz A. Mayer T. Bashir M. Pieber T. De León P. Venkateswaran K. "Human presence impacts fungal diversity of inflated Lunar/Mars analog habitat". W: *Microbiome* (2017), s. 5. doi: doi:10.1186/s40168-017- 0280-8..
- [165] Mayer T. Blachowicz A. Probst A. Vaishampayan P. Checinska S. Swarmer T. De León P. Venkateswaran K. "Microbial succession in an inflated lunar/Mars analog habitat during a 30-day human occupation". W: *Microbiome* (2016), s. 4. doi: doi:10.1186/s40168-016-0167-0..
- [166] van Broock L. De León P. Vigo D. 2015. doi: doi:10.12691/ajmbr-3- 4-5..
- [167] Poland Lunares Blanc A Authier L Foing B. Lillo A Evellin P Kolodziejczyk A. Heinicke Ch. Harasymczuk M. Chahla C Tomic A Hettrich S. Estec Esa. 2017, doi:10.13140/RG.2.2.22764.05767..
- [168] Foing B. Boche-Sauvan L. Stoker Carol Ehrenfreund Pascale Wendt Lorenz Gross Christoph Thiel Cora Peters S Borst Anouk Zhavaleta J Sarra- zin Philippe Blake D. Page J Pletser Vladimir Monaghan Euan Mahapatra Pooja Wills Danielle Noroozi Arash Walker R Team Eurogeomars. 2010.
- [169] Gruber S. Groemer G. Paternostro S. Larose T. "AMADEE-18 and the Analog Mission Performance Metrics Analysis: A Benchmarking Tool for Mission Planning and Evaluation". W: *Astrobiology* (2020). doi:/10.1089/ast.2019.2034.
- [170] Kobrick R. L. Garcia D. M. Miller L. S. Covello C. A. Lopac N. Olthoff C. T. Groemer G. "RxEVA: Prescribing Human Performance Exploration Limits for Surface Operations". W: 2020.
- [171] Velho R. Posselt B. Dobrovolny S. Zoller A. Groemer G. Kaufmann N. Ward P. Rehnberg L. "Mars Analog mission: A medical perspective". W: *JBIS* (2020), s. 0007-084X.
- [172] Ravanis E. Sejkora N. Groemer G. Gruber S. "Preparing a Mars analogue mission - Flight Planning for AMADEE-20". W: 2020.

- [173] Gruber S. Groemer G. Haider O. "Inspiring the next generation through the AMADEE-18 MARS analog simulation". W: *Acta Astronautica* (2019), s. 204–211.
- [174] url: <https://oewf.org/en/portfolio/amadee-18/>. Dostęp 1.12.2023
- [175] url: <https://www.d-mars.org/>. Dostęp 1.12.2023
- [176] Amichay R. Lewis O. Blair E. "Israeli scientists complete mock Mars mission in Negev desert". W: *Reuters, Science News* February 18, 2018. (2018).
- [177] Rubinstein H. Sorek–Abramovich R. Linn Barnett D. Nevenzal H. Shikar A. Bainberg S. Yair Y. Paz Y. Shvartzberg J. Dahan D. Parnas N. Margulyan K. Mauda S. Abramovich R. Chen N. Raizanski M. Orlov Y. Schenker E. Aharonson O. Kushnir N. "The 2019 Analog Mars Mission Season at the Desert Mars Analog Ramon Station." W: 2019.
- [178] Boscheri G. Lobascio C. Schubert D. "The EDEN ISS Rack–Like Plant Growth Facility". W: 2016.
- [179] Schlacht I. Bernini J. Schubert D. Zabel P. Montanari C. Ceppi G. Imhof B. Waclavicek R. Foing B. "EDEN ISS: Human Factors and Sustainability for Space and Earth Analogue". W: 2016. ISBN: 9781510835825.
- [180] Beblo–Vranesevic K. Fahrion J. Schubert D. Van Houdt R. Eikmanns B. Rettberg P. "Microbial Monitoring in the EDEN ISS Greenhouse, a Mobile Test Facility in Antarctica". W: *Front. Microbiol.*, 31 March 2020, Sec. Extreme Microbiology (2021). doi: doi . org / 10 . 3389 / fmicb . 2020 . 00525.
- [181] Zabel P. Zeidler C. Vrakking V. Schubert D. Hogle M. "Summary and Evaluation of the EDEN ISS Public Outreach Activities". W: 2020.
- [182] Poulet L. Zeidler C. Bunchek J. Zabel P. Vrakking V. Schubert D. Massa G. Wheeler R. "Crew time in a space greenhouse using data from analog missions and Veggie". W: *Life Sciences in Space Research* (2021), s. 101–112. doi: doi:10.1016/j.lssr.2021.08.002..
- [183] Shuangsheng Guo Wenping Dong Weidang Ai Hongqi Feng Yongkang Tang Zhide Huang Yunze Shen et al. "Research on regulating technique of material flow for 2–person and 30–day integrated celss test". W: *Acta Astronautica* (2014).
- [184] Kun Dai Qingni Yu Zhou Zhang Yuan Wang Xinming Wang. "Aromatic hydrocarbons in a controlled ecological life support system during a 4–person–180–day integrated experiment". W: *The Science of The Total Environment* (2018), s. 905–911. doi: doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.164.
- [185] Shuangsheng Guo Weidang Ai Jinxue Fei Guoxin Xu Gu Zeng Yunze Shen. "Study on the kinetic characteristics of trace harmful gases for a two–person–30–day integrated celss test". W: *Environmental science and pollution research international* (2015), s. 7020–7024.

- [186] Guo S. Liu X. Ai W. Tang Y. Zhu J. Wang X. Wei M. Qin L. Yang Y. "Development of an improved ground-based prototype of space plant-growing facility". W: *Advances in Space Research* (2008), s. 736–741. doi: doi.org/10.1016/j.asr.2007.09.013.
- [187] Guo S.S.Mao R.X. Zhang L.L.Tang Y. K. Li Y. H. "Progress and prospect of research on controlled ecological life support technique". W: *REACH* (2017), s. 1–10.
- [188] Heinicke C. Orzechowski L. Avila M. "The MaMBA-concept for an extra-terrestrial base and its first module mock-up". W: *Acta Astronautica* (2020), s. 404. doi: doi:10.1016/j.actaastro.2020.04.026.
- [189] Heinicke Ch. Solmaz A. Baqué M. Correale G. Fateri M. Jaret S. Kopacz N. Ormö J. Poulet L. Verseux C. "Equipping an extraterrestrial laboratory: Overview of open research questions and recommended instrumentation for the Moon". W: *Advances in Space Research* (2021), s. 2565–2599. doi: doi:10.1016/j.asr.2021.04.047..
- [190] Rita A. Freitas G. Schülke A. Glaser S. Michelmann P. et al. "Conversational user interfaces to support astronauts in extraterrestrial habitats." W: 2021. doi: doi:10.1145/3490632.3490673..
- [191] von Einem M. Groll R. Heinicke Ch. "Computational modeling of a ventilation concept for a lunar habitat laboratory". W: *Journal of Space Safety Engineering* (2022), s. 145–153. doi: doi:10.1016/j.jsse.2022.02.005.
- [192] Heinicke Ch. Verseux C. "The MaMBA facility as a testbed for bioregenerative life support systems. *Life Sciences in Space Research*". W: *Life Sciences in Space Research* (2022), s. 86–89. doi: doi:10.1016/j.lssr.2022.08.009..
- [193] url: <https://saga.dk/projects/lunark/habitat>. Dostęp 1.12.2023
- [194] Riva P. Rusconi P. Pancani L. Chterev K. "Social isolation in space: An investigation of LUNARK, the first human mission in an Arctic Moon analog habitat". W: *Acta Astronautica* (2022), s. 215. doi: doi:10.1016/j.actaastro.2022.03.007..
- [195] João H. „Teamwork Challenges During 3 month Space Analogue Mission in the Arctic” 2020. doi: doi:10.13140/RG.2.2.30950.86087.
- [196] url: <https://www.saga.dk/>. Dostęp 1.12.2023
- [197] url: <https://www.hydronaut.eu/cs>. Dostęp 1.12.2023
- [198] url: <https://aktualne.cvut.cz/en/reports/20220822-space-exploration-begins-underwater>.
- [199] url: <https://hydronaut.eu/en/>. Dostęp 1.12.2023
- [200] Casini R. Mittler Petra Cowley Aidan Schlüter Lukas Faber Marthe Fischer Beate von der Wiesche Melanie Maurer Matthias. "Lunar analogue facilities development at EAC: the LUNA project". W: *Journal of Space Safety Engineering* (2020), s. 510–518. doi: doi:10.1016/j.jsse.2020.05.002..

- [201] Casini A. Mittler P. Cowley A. Schlüter L. Faber M. Fischer B. von der Wiesche M. Maurer M. "Lunar analogue facilities development at EAC: the LUNA project". W: Journal of Space Safety Engineering (2020), s. 510-518. doi: doi.org/10.1016/j.jsse.2020.05.002..
- [202] Yashar M. Glasgow C. Mehlomakulu B. Ballard J. Covey S. "Constructing NASA's Crew Health and Performance Exploration Analog (CHAPEA): A 3D-Printed Habitat by ICON/BIG". W: 2022.
- [203] Yashar M. Glasgow C. Mehlomakulu B. Ballard J. Salazar J. Mauer S. Covey S. 2022. doi: doi:10.1061/9780784484470.082..
- [204] url: <https://www.iconbuild.com/projects/mars-dune-alpha>. Dostęp 1.12.2023
- [205] url: <https://samb2.space/%20online%20dost%C4%99p%202022-12-26>. Dostęp 1.12.2023