

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY

Rozprawa doktorska

mgr inż. Krzysztof Skarżyński

SYSTEM OCENY ZANIECZYSZCZENIA ŚWIATŁEM
I EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ W ILUMINACJI OBIEKTÓW

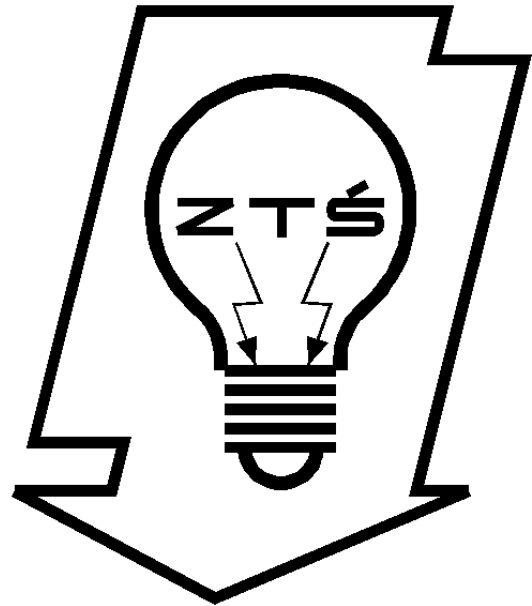
Promotor:
prof. dr hab. inż. Wojciech Żagan

Promotor pomocniczy:
dr inż. Sebastian Słomiński

Warszawa, marzec 2019

*Serdecznie podziękowania kieruję do mojego promotora
Pana Profesora Wojciecha Żagana, za przekazanie mi pasji
związanej z techniką świetlną oraz cenne uwagi
w trakcie realizacji tej rozprawy doktorskiej.*

*Dziękuję również moim najbliższym: Myszce, Rodzicom, Siostram,
całej rodzinie oraz przyjaciołom za obecność w moim życiu,
a także kolegom i koleżankom z Wydziału Elektrycznego
Politechniki Warszawskiej za miłą atmosferę w pracy.*



~ „PRIMUM NON NOCERE” ~

STRESZCZENIE

Głównym celem rozprawy doktorskiej jest stworzenie systemu ilościowej oceny efektywności energetycznej i zanieczyszczenia światłem dla potrzeb projektowania iluminacji obiektów architektonicznych. Taki system oceny został zakwalifikowany jako potrzebny i w znacznym stopniu udoskonalający, poszerzający obecne podejście do tworzenia iluminacji obiektów.

Ocena ilościowa odbywa się na podstawie nowych, możliwych do obliczenia i mierzalnych parametrów – sprawności iluminacji, maksymalnej sprawności iluminacji, wskaźnika wykorzystania sprawności iluminacji, energetycznej sprawności iluminacji oraz przewymiarowania luminancji. Dla potrzeb systemu zostały stworzone metody obliczeń strumienia użytecznego i nieużytecznego umożliwiające obliczenie wartości wszystkich przedstawionych parametrów. System ujęty został w ramach algorytmu oceny i posiada pewne charakterystyczne cechy. Pierwszą z nich jest możliwość ilościowej oceny, nad którą w dalszym ciągu nadrzędną rolę pełni uzyskiwany efekt estetyczny jako ten tożsamy z podstawowym celem iluminacji obiektów – ekspozycji nocnego obrazu architektury obiektu, a w efekcie całego obszaru. Druga cecha związana jest z możliwością kontroli efektywności energetycznej, ulepszania jej poprzez dążenie do jak najbardziej racjonalnego wykorzystania energii elektrycznej danej instalacji iluminacyjnej. Stwarza to również możliwość redukcji mocy (strumienia świetlnego) zastosowanych opraw oświetleniowych, poprzez bardziej odpowiedni dobór ich brył fotometrycznych, ich lokalizacji oraz wycelowania, a także doboru rozkładu widmowego źródeł światła do właściwości oświetlanych materiałów, z których zbudowana jest elewacja obiektu. Fakt poprawy efektywności energetycznej iluminacji ma nie tylko pozytywny wpływ na środowisko naturalne, poprzez mniejsze zużycie energii, lecz również poprzez mniejszą emisję strumienia świetlnego w przestrzeń wokół obiektu, warunkującą szkodliwe zjawisko zanieczyszczenia światłem środowiska.

W toku badań zawartych w niniejszej rozprawie doktorskiej dokonano przeglądu literatury, jak również szeregu analiz, symulacji oraz pomiarów, które w zdecydowany sposób udowadniają poprawność działania systemu w praktyce projektowej. Daje to na pewno większe możliwości tworzenia iluminacji z uwzględnieniem inżynierskiej poprawności wykonywania projektu oświetlenia, jakim jest projekt iluminacji. Dodatkowo system oceny nie narzuca sztywnych ram, mając na uwadze subiektywność odbioru piękna stworzonej i zrealizowanej iluminacji danego obiektu.

słowa kluczowe:

technika świetlna, iluminacja obiektów, efektywność energetyczna, zanieczyszczenie światłem

ABSTRACT

The main aim of this doctoral dissertation is to create a system for the quantitative assessment of energy efficiency and light pollution for the purposes of floodlighting designs of architectural objects. Such a system of evaluation has been proven to be necessary and, to a great extent, has perfected the current approach to the floodlighting of objects.

This quantitative assessment is based on new, possible to calculate and measurable parameters: floodlighting utilisation factor, maximum floodlighting utilisation factor, coefficient of floodlighting utilisation factor, floodlighting energy utilisation factor and oversizing luminance. For the purposes of this system, methods for calculating the useful luminous flux and loss of luminous flux have been created, enabling the calculation of the values of all the parameters presented. The system has been included as part of an evaluation algorithm and has some characteristic features. The first of these is the possibility of a quantitative assessment, over which the aesthetic effect still has the overriding role, which is the same as the basic purpose of the floodlighting of objects – the exposure of the night image of the architectural form of the object and, as a result, its entire area. The second feature is related to the possibility of the control of energy efficiency, improving it by striving for the most rational use of electricity at a given floodlighting installation. It also makes it possible to reduce the power (luminous flux) of the luminaires used, through the more appropriate selection of photometric solids, their location and aim, as well as the selection of spectral power distribution of light sources, with regard to the properties of the illuminated materials of the object. Improving the energy efficiency of floodlighting has a positive impact on the natural environment, not only through lower energy consumption, but also through the lower emission of luminous flux into the space around the object, which is linked to the inconvenient phenomenon of light pollution.

The research included in this doctoral dissertation, a review of the literature, as well as a series of analyses, simulations and measurements, clearly demonstrates the correctness of the system in design practice. This creates a significantly greater opportunity to create appropriate floodlighting designs, including technically correct lighting designs, which should be the aim of any floodlighting project. In addition, the evaluation system does not impose a rigid framework, given the subjectivity of the perception of the beauty of the created and implemented floodlighting scheme of a given object.

keywords:

lighting technology, floodlighting, energy efficiency, light pollution

SPIS TREŚCI

WPROWADZENIE	11
1. ANALIZA EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ I ZJAWISKA ZANIECZYSZCZENIA ŚWIATŁEM W ILUMINACJI OBIEKTÓW	13
1.1. Wprowadzenie do zagadnienia iluminacji obiektów	13
1.1.1. Dawne i obecne podejście do projektowania iluminacji obiektów.....	16
1.1.2. Wydobywanie piękna architektury za pomocą sztucznego oświetlenia	18
1.2. Efektywność energetyczna jako pojęcie pierwotne	21
1.2.1. Zużycie energii na potrzeby oświetleniowe	22
1.2.2. Audyt energetyczny, modernizacja oświetlenia oraz prowadzone badania naukowe	23
1.3. Zanieczyszczenie światłem środowiska – problem interdyscyplinarny.....	25
1.3.1. Modelowanie i kontrola zanieczyszczenia światłem.....	28
1.3.2. Pomiary zanieczyszczenia światłem i pomiarowe bazy danych.....	30
1.3.3. Wpływ zanieczyszczenia światłem na organizmy żywe	31
1.3.4. Normy, raporty techniczne związane z oceną zanieczyszczeniem światłem oraz polityka państw względem tego zjawiska	32
1.3.5. Aktywności społeczne ograniczające zanieczyszczenie światłem	36
1.4. Podsumowanie.....	38
2. OKREŚLENIE PROBLEMU NAUKOWEGO, TEZY I CELU PRACY	39
2.1. Kwestia inżynierskiej oceny projektu iluminacji.....	39
2.2. Kwestia ulepszania projektu iluminacji.....	40
3. NOWE PARAMETRY OCENY EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ I ZANIECZYSZCZENIA ŚWIATŁEM ŚRODOWISKA W ILUMINACJI OBIEKTÓW	41
3.1. Definicja sprawności iluminacji	41
3.1.1. Wstępne obliczenia sprawności iluminacji	42
3.1.2. Pomiary sprawności iluminacji	46
3.2. Wpływ rozkładu widmowego źródła światła na efektywność energetyczną iluminacji.....	51
3.3. Inne parametry oceny efektywności energetycznej i zanieczyszczenia światłem	54
3.4. Metody obliczeń sprawności iluminacji (i pozostałych paramentów).....	58
3.4.1. Założenia ogólne obliczeń.....	58
3.4.2. Obliczenia strumienia użytecznego.....	59
3.4.3. Obliczenia strumienia nieużytecznego	60
3.4.4. Analiza dokładności i wiarygodności obliczeń wykonywanych przy pomocy programu 3dS Max	63

4. APLIKACJA NOWYCH PARAMETRÓW DLA POTRZEB OCENY EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ I ZANIECZYSZCZENIA ŚWIATŁEM ZŁOŻONYCH PROJEKTÓW ILUMINACJI.....	67
4.1. Podział architektury – obiekty wytypowane do obliczeń	67
4.2. Metodologia obliczeń oraz sprzęt oświetleniowy	68
4.2.1. Obiekt rozłożysty.	70
4.2.2. Obiekt strzelisty	73
4.2.3. Obiekt inżynierski	78
4.2.4. Obiekt zlokalizowany w pierzei	80
4.2.5. Obiekt nowoczesny	83
4.3. Wyniki obliczeń sprawności iluminacji dla wytypowanych obiektów	88
5. MOŻLIWOŚCI ULEPSZANIA PROJEKTU ILUMINACJI	92
5.1. Metody ulepszania projektu iluminacji	92
5.1.1. Informacje ogólne	92
5.1.2. Przykład symulacyjno–obliczeniowy 1: zmiana wycelowania opraw oświetleniowych i porównanie metod iluminacji	97
5.1.3. Przykład symulacyjno – obliczeniowy 2: zmiana bryły fotometrycznej oprawy oświetleniowej..	108
5.1.4. Przykład symulacyjno–obliczeniowy 3: zmiana rozkładu widmowego źródła światła.....	110
5.2. Podsumowanie przykładów obliczeniowych	113
6. ALGORYTM PROJEKTOWANIA ILUMINACJI PRZY WYKORZYSTANIU NOWYCH PARAMETRÓW OCENY.	115
7. PODSUMOWANIE	119
7.1. Konkluzja	119
7.2. Dowody założonych tez.....	122
7.3. Osiągnięcia własne	123
7.4. Wnioski końcowe	124
7.5. Perspektywa kontynuacji prac badawczych w opisywanym obszarze	125
8. LITERATURA	127
KARTY KATALOGOWE OPRAW OŚWIETLENIOWYCH	134

ZALĄCZNIK A: Schematyczne rozmieszczenie opraw oświetleniowych dwóch koncepcji projektu iluminacji obiektu rozłożystego	137
ZALĄCZNIK B: Schematyczne rozmieszczenie opraw oświetleniowych dwóch koncepcji projektu iluminacji obiektu strzelistego	141
ZALĄCZNIK C: Schematyczne rozmieszczenie opraw oświetleniowych dwóch koncepcji projektu iluminacji obiektu inżynierskiego.....	146
ZALĄCZNIK D: Schematyczne rozmieszczenie opraw oświetleniowych dwóch koncepcji projektu iluminacji obiektu zlokalizowanego w pierzei	148
ZALĄCZNIK E: Schematyczne rozmieszczenie opraw oświetleniowych dwóch koncepcji projektu iluminacji obiektu nowoczesnego	150
ZALĄCZNIK F: Schematyczne rozmieszczenie opraw oświetleniowych dwóch koncepcji projektu iluminacji Białego Domku	155

WPROWADZENIE

W ostatnich latach można zauważyć coraz większą powszechność kreowania nocnego wizerunku różnych obiektów – iluminacji obiektów [1]. Z całym przekonaniem, można stwierdzić, że jest to zagadnienie interdyscyplinarne, które stale się rozwija. Iluminacja obiektów, z jednej strony wywodzi się z elektrotechniki, ze względu na swój silny związek z techniką świetlną. Z drugiej, z architektury, przez fakt że najczęściej oświetlane są właśnie obiekty architektoniczne, charakteryzujące się różnymi stylami, konstrukcją, wyglądem i wykonaniem.

Coraz większa popularność iluminacji obiektów jest bezdyskusyjna. Stwierdzenie to znajduje swoje potwierdzenie w olbrzymiej liczbie zrealizowanych projektów, dzięki zastosowaniu metody wizualizacji komputerowej oświetlenia w toku projektowym [2]. Oświetlane są nie tylko budowle zabytkowe, takie jak pałace, zamki, kamienice, lecz również obiekty nowoczesne, obiekty inżynieryjne: mosty, szyby kopalniane, rafinerie czy nawet linie energetyczne. Wszystko to po to, żeby wyeksponować piękno architektury, pokreślić istotę i ważność pełnionej funkcji oświetlanego obiektu, zwrócić uwagę obserwatora na inżynieryjny kunszt wykonania i kształtować nocny krajobraz świata, tak bardzo zmieniony przez naszą cywilizację [3].

Każdy projekt iluminacji, podobnie jak większość oświetlanych obiektów, jest jedyny w swoim rodzaju, niepowtarzalny, ale czy na pewno najpiękniejszy jaki może być? Nie trzeba być wytrawnym obserwatorem – inżynierem zajmującym się projektowaniem oświetlenia, posiadającym wiedzę z zakresu iluminacji, aby zauważyć, że jednak ogromna liczba zrealizowanych już projektów wykonana jest niedbale [4]. Najczęściej uwidacznia się to przez sztuczne zastosowanie zbyt dużej liczby opraw oświetleniowych, ich niepoprawnego wycelowania, wygaśnięcia części źródeł światła lub opraw oświetleniowych. Uwagę często zwraca również niczym nieuzasadnione zastosowanie różnych temperatur barwowych źródeł światła, co znaczącym stopniu wpływa na jakość odbioru danej iluminacji [5,6]. Do głównych przyczyn tego niefortunnego faktu zaliczyć należy m. in.:

- wykonywanie projektów iluminacji przez osoby, które zupełnie nie znają się na tym zagadnieniu,
- nastawienie firm oświetleniowych na sprzedaż jak największej liczby opraw oświetleniowych,

- brak nadzoru autorskiego nad wykonawstwem projektu iluminacji (kwestie dokładności montażowej),
- brak zdefiniowanego systemu konserwacji tego typu oświetlenia dla poszczególnych projektów,
- brak jednolitych wymagań projektowych dla potrzeb oświetlenia architektonicznego.

Należy również pamiętać, że oświetlenie iluminacyjne jest często określane przez ludzi nie związanych z techniką świetlną, jako „podświetlenie”. Jest w tym dużo racji, ponieważ diametralnej większości przypadków oświetlenie iluminacyjne zrealizowane jest „od dołu do góry”, zdecydowanie rzadziej „od góry do dołu” [7]. Jednak niezależnie od tego, w którą stronę następuje oświetlenie, część strumienia świetlnego pochodzącego ze źródeł światła i z opraw oświetleniowych jest emitowana w górną półprzestrzeń, czy to ze względu na nieodpowiedni dobór sprzętu oświetleniowego (konstrukcja, bryła fotometryczna), jego zły montaż, wycelowanie czy też zjawiska odbicia i przepuszczania przez powierzchnie przeznaczone do oświetlenia. Warunkuje to, szeroko komentowane ostatnio w literaturze, zanieczyszczenie środowiska światłem [8,9,10,11,12,13,14]. Literatura w większości określa to zjawisko jako niekorzystne, o negatywnym wpływie na rozwój roślin i życie zwierząt, zwłaszcza tych, które funkcjonują w nocy [15,16]. Sztuczne światło może zaburzać również rytm okołodobowy ludzi, a także wpływać na zdrowie i występowanie niektórych chorób [17,18,19]. Ponadto, w wyniku nienaturalnego rozjaśnienia nocnego nieboskłonu, obserwacja ciał niebieskich jest utrudniona, a praca profesjonalnych astronomów jest czasami niemożliwa do wykonania [20,21]. Negatywnie wpływa to również na rozwój astroturystyki i amatorskich obserwacji astronomicznych.

Zjawisko zanieczyszczenia światłem w bezpośredni sposób łączy się z kwestią efektywności energetycznej oświetlenia. Można przypuszczać, że w miejscach gdzie występuje wysoki poziom zanieczyszczenia światłem, część zewnętrznych instalacji oświetleniowych (oświetlenia dróg i ulic, czy też iluminacji obiektów) zaprojektowana lub użytkowana jest w nieodpowiedni sposób. Ważne jest zatem, żeby projektując jakiegokolwiek oświetlenie zewnętrzne, brać pod uwagę kwestie zanieczyszczenia światłem. Próba powiązania zagadnień iluminacji obiektów, efektywności energetycznej oświetlenia i zanieczyszczenia światłem środowiska nie została do tej pory podjęta. Z punktu widzenia szeroko rozumianej ochrony środowiska wydaje się, że jest to istotne i uzasadnione zagadnienie badań naukowych w tym obszarze.

1. ANALIZA EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ I ZJAWISKA ZANIECZYSZCZENIA ŚWIATŁEM W ILUMINACJI OBIEKTÓW

1.1. Wprowadzenie do zagadnienia iluminacji obiektów

Iluminację obiektów architektonicznych można uznać za naturalną odpowiedź środowiska inżynierskiego, architektów, projektantów instalacji elektrycznych na pojawienie się na rynku elektrycznych źródeł światła na początku XX w. W iluminacyjnych początkach, systemy wykorzystujące źródła żarowe, świetlówkowe były dość problematyczne w realizacji ze względu na duże moce instalowane (kwestia zastosowania odpowiednich zabezpieczeń instalacji), a przez to również bardzo energochłonne [22]. Kolejnym problemem była stosunkowo niska trwałość tych źródeł światła, co z kolei w negatywny sposób wpływało również na kwestię konserwacji tego typu oświetlenia w postaci wymiany przepalonych sztuk. Ograniczenia związane były również z możliwościami sterowania takimi instalacjami ze źródłami żarowymi, czy to w przypadku potrzeby zmiany ich temperatury barwowej, czy też ściemniania i oświetlenia dynamicznego [23,24]. Tym nie mniej, projekty iluminacji były wykonywane już w latach 20 ubiegłego stulecia (w można przypuszczać, że również nieco wcześniej). Ze względu na trudności realizacyjne, energochłonność, problematykę braku odpowiedniego sprzętu oświetleniowego było ich stosunkowo mało. Przykładowe projekty iluminacji z tego okresu można odnaleźć np. w archiwum prac dyplomowych Zakładu Techniki Światlnej Politechniki Warszawskiej:

1. „Projekt oświetlenia Gmachu Głównego PW” – inż. Wacław Ziółkowski, promotor: doc. dr inż. W. Felhorski, rok 1955 [25],
2. „Oświetlenie mostów”, mgr Andrzej Grochowski oraz mgr Jerzy Dominiak, promotor: doc. dr inż. W. Felhorski, rok 1958 [25].

Podziw budzi niewątpliwie fakt, że wówczas projektowanie oświetlenia odbywało się tylko i wyłącznie „na papierze”. Zastosowanie metod CAD (*ang. Computer Aided Design*) oraz innych programów w dokładny sposób symulujących rzeczywiste prawa fizyki, które rządzą zjawiskami świetlnymi mogło nie być nawet w planach ówczesnych inżynierów. Projektowanie iluminacji, przy tych bardzo ograniczonych z perspektywy 2019 roku możliwościach zarówno pod względem oświetleniowych, jak i wizualizacyjnym było jednak wykonywane. Ponadto, źródła literaturowe z początków XX w. donoszą nawet o realizacjach projektów iluminacji (rys. 1.1).



Rys. 1.1. Przykłady projektów iluminacji zrealizowanych na początku XX w. za pomocą opraw oświetlenia żarowego, od lewej: Statua Wolności w USA (1916 r.), Łuk Triumfalny w Paryżu (1928 r.), Koloseum w Rzymie (1930 r.), Pomnik Lotnika w Warszawie (1934 r.), Pałac Saski w Warszawie (1934 r.) [26,27]

Upowszechnienie stosowalności oświetlenia elektrycznego w XX w. oraz dynamiczny rozwój technologii, konstrukcji i systemów sterowania źródeł światła spowodował również popularyzację realizacji licznych projektów iluminacji różnych typów obiektów. Najczęściej iluminowane obiekty można zasadniczo podzielić na trzy kategorie (przykłady: rys 1.2 – 1.4):

1. Obiekty o istotnym znaczeniu historycznym – najczęściej barokowe pałace, kościoły wykonanie praktycznie w każdym stylu architektonicznym, staromiejskie kamienice etc.
2. Obiekty o istotnym znaczeniu politycznym – siedziba prezydenta RP, ambasady etc.
3. Obiekty związane z użytecznością publiczną, rozrywką oraz obiekty prywatne – np. siedziby dużych firm, banków, muzea, kluby muzyczne, hotele, bloki mieszkalne etc.



Rys. 1.2. Iluminacja Grobu Nieznanego Żołnierza w Warszawie jako przykład iluminacji obiektów o dużym znaczeniu historycznym



Rys. 1.3. Iluminacja budynku ambasady Arabii Saudyjskiej w Warszawie jako przykład iluminacji zarówno budynków nowoczesnych jak i użyteczności publicznej o istotnym znaczeniu politycznym



Rys. 1.4. Przykład iluminacji bloku mieszkalnego znajdującego się przy ulicy Dereniewej w Warszawie



Rys. 1.5. Zdjęcie dzienne przykładowego obiektu



Rys. 1.6. Zdjęcie dzienne tego samego obiektu przerobione komputerowo



Rys. 1.7. Wizualizacja komputerowa iluminacji tego samego obiektu [28]

Przebywając w mieście w godzinach wieczornych i patrząc jak kształtuje się jego nocny krajobraz, można mieć wrażenie, że rzeczywiście coraz więcej obiektów jest iluminowanych. Niestety fakt, że koncepcje iluminacji poszczególnych budynków wykonywane są przez różnych projektantów i firmy oświetleniowe sprawia, że w efekcie nocny obraz miasta jest bardzo zaburzony, niespójny i nieuporządkowany [29,30].

Brak spójności jest również zdaniem autora najczęściej spotykanym błędem w przypadku iluminacji pojedynczego obiektu. Rozwiązaniem tego problemu jest oczywiście stworzenie szczegółowego masterplanu oświetlenia poszczególnych obszarów miasta, który uwzględniałby oświetlenie każdego rodzaju (uliczne, iluminacyjne, parkowe) [31]. Jednak w przypadku jego braku, projektując iluminację danego obiektu, można pomocniczo opracowanie koncepcji oprzeć na następujących działaniach: odnieść się do zdjęcia obrazu obiektu widzianego w świetle dziennym (rys. 1.5), a następnie zastosować efekt negatywu oraz odpowiednie zwiększenie kontrastu w programie komputerowym (rys. 1.6). Dzięki temu można uzyskać efekt wizualny, który dość konkretnie przedstawia, które powierzchnie obiektu mogą zostać doświetlone (a które nie) zachowując przy tym dużą spójność obrazu wizualizacji komputerowej obiektu (rys. 1.7).

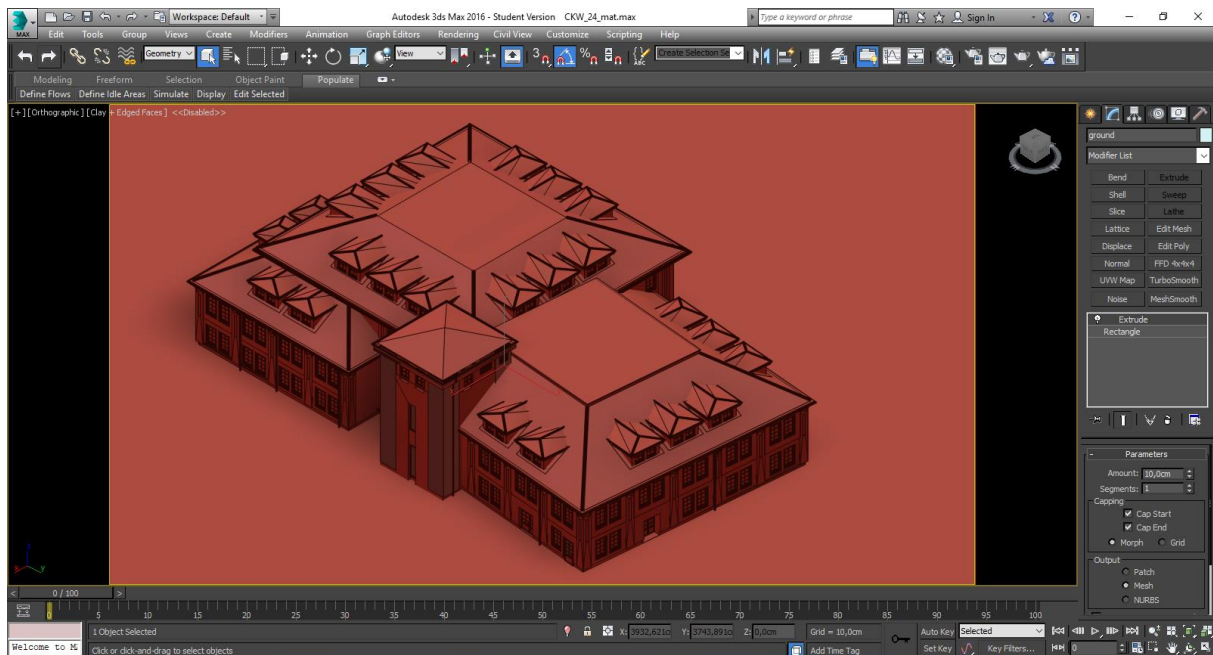
1.1.1. Dawne i obecne podejście do projektowania iluminacji obiektów

Analizując projekty powstające przez cały XX w., trzeba mieć na uwadze, że wspomaganie komputerowe w technice świetlnej pojawiło się dopiero w latach 90-tych (programy DIALux – początek lat 90-tych, 3dS MAX 1.0 – 1996 r.). Do tamtej pory jedynym sposobem sprawdzenia efektu estetycznego stworzonej koncepcji iluminacji była próba terenowa (pomijając oczywiście „obrazy wizualizacyjne” stworzone na papierze przy wykorzystaniu dowolnej techniki malarskiej, jako że często nie oddające realiów sprzętu oświetleniowego). Zabieg ten polega na wykorzystaniu rzeczywistego sprzętu oświetleniowego, jego zaplanowanego umiejscowienia, wycelowania i podłączenia. Próba terenowa oprócz oczywistej zalety w postaci tymczasowej realizacji określonej koncepcji iluminacji i określenia, czy jest ona odpowiednia dla danej geometrii obiektu, posiada również szereg wad. To najważniejszych z nich należą przede wszystkim czasochłonność, zależność od warunków atmosferycznych oraz koszty wykonania takiej tymczasowej instalacji, jak również ograniczenie do praktycznie jednej koncepcji iluminacji. Czasami też próby terenowe ograniczają się jedynie do fragmentu danego obiektu, ze względu na konieczność budowania rusztowań, co znacznie utrudnia ich realizację. Tym nie mniej obecne praktyki projektowe pokazują, że tego typu zabiegi są w dalszym ciągu stosowane w niektórych przypadkach [32].

Pewną formą próby terenowej, jednak pozbawioną zależności od warunków atmosferycznych oraz niewymagającej tak wysokich nakładów finansowych jest stworzenie koncepcji iluminacji na podstawie rzeczywistego modelu danego obiektu wykonanego w odpowiedniej skali [33]. Model może być wykonany w postaci makiety lub wydruku

z drukarki 3d. Należy jednak pamiętać, że tego typu modelowe badania są ekstremalnie czasochłonne (kwestia przygotowania geometrii obiektu i materiałów do jego budowy lub też wydruk na drukarce 3d), jednak na pewno są bardzo satysfakcjonujące dla autora projektu i dają mu duże możliwości kształtowania odpowiedniego rozwiązania oświetleniowego. Co prawda, jeżeli chodzi o oświetlenie modelu za pomocą odpowiednio przeskalowanych brył fotometrycznych rzeczywistych opraw oświetleniowych (miniaturyzacja sprzętu na bazie LED), czas tworzenia iluminacji modelu może znacząco się wydłużyć. Jest to spowodowane przede wszystkim potrzebą dobrania (stworzenia) odpowiednich kolimatorów do źródeł LED. Problem ten można jednak rozwiązać za pomocą wykorzystania projektora multimedialnego, kształtującego zadany rozkład luminancji na modelu obiektu [34,35]. Ostatnie badania z tego zakresu, pokazują że jest to bardzo wygodna i skuteczna metoda wizualizacji, a nawet realizacji projektu iluminacji w rzeczywistej skali, jednak oczywiście nie pozbawiona wad w postaci kwestiach termicznych pracy projektora na zewnątrz, jak również doświetlania płaszczyzn prostopadłych do kierunku emisji światła z urządzenia.

Podejściem obecnie najczęściej stosowanym w projektowaniu iluminacji jest metoda wizualizacji komputerowej. Jest to bez wątpienia najbardziej wygodny sposób dający właściwie nieograniczone możliwości, jeżeli chodzi o liczbę koncepcji iluminacji danego obiektu [2]. Projektowanie tą metodą polega na stworzeniu w graficznym programie komputerowym takim jak, 3ds Max, SketchUp, Blender, siatki geometrycznej odwzorowującej rzeczywistą geometrię danego obiektu. Funkcje zawarte w tych programach umożliwiają również nadanie odpowiednim płaszczyznom konkretnych wartości parametrów transmisyjno-refleksyjnych, dzięki czemu można z dużą dokładnością zasymulować materiały występujące w rzeczywistości. Zaimplementowane w programach algorytmy obliczeniowe realizują rzeczywiste prawa fizyczne występujące w przyrodzie, a związane z rozchodzeniem się światła w różnych ośrodkach, jak również jego odbiciach i przechodzeniu do innych ośrodków [36]. Ponadto, dzięki odpowiedniemu, elektronicznemu zapisowi uzyskanych pomiarów bryły fotometrycznej oprawy oświetleniowej (np. .ies, .ldt), można do programu wprowadzić wielkości i wartości fotometryczne rzeczywistych opraw oświetleniowych. Wykonując obliczenia (rendering) takiego przygotowanego komputerowego modelu (siatka, materiały, sprzęt oświetleniowy) można uzyskać bardzo dokładną, wręcz fotorealistyczną wizualizację stworzonej koncepcji iluminacji [1]. Przykład wizualizacji stworzonej w programie 3ds max został przedstawiony na rys. 1.7, a interfejs programu przedstawia rys. 1.8.



Rys. 1.8. Interfejs programu Autodesk 3ds Max, służącego do tworzenia m.in. komputerowych modeli geometrycznych (jeden widoczny w programie) oraz zaawansowanych wizualizacji komputerowych

1.1.2. Wydobywanie piękna architektury za pomocą sztucznego oświetlenia

Na podstawie dwóch poprzednich rozdziałów widać, że zagadnienie iluminacji obiektów jest bardzo złożone. W toku projektowania iluminacji obiektów przez ostatnie ponad 100 lat, wyodrębniły się dwie główne metody iluminacji: metoda zalewowa oraz metoda punktowa, które poniekąd stanowią swoje przeciwieństwo. Zestawienie głównych cech tych metod zostało przedstawione w tabelicy 1.1. Należy jednak pamiętać, że wybór konkretnej metody iluminacji nie zawsze jest dowolny. Istnieje kilka istotnych czynników, które na niego wpływają. Do najważniejszych z nich należy zaliczyć odległość obserwacji oraz widoczność detali architektonicznych (a także zalecenia konserwatora zabytków, jeżeli iluminowany obiekt znajduje się pod jego ochroną). Wynika z tego, że metoda zalewowa powinna być stosowana w sytuacji, w której oświetlenie następuje z dużej odległości i nie można przez to w jednoznaczny sposób odróżnić detali architektonicznych lub takie detale nie występują (rys. 1.9) [37]. Natomiast oświetlenie za pomocą metody punktowej, powinno być realizowane w przypadku, gdy obiekt charakteryzuje się bardzo wysoką złożonością geometrii elewacji oraz bogactwem detali architektonicznych (np. styl barokowy) [38]. Dodatkowo, czynnikiem predysponującym do realizacji metody punktowej jest niewielka odległość, z której następuje obserwacja (taka, że przeciętny obserwator bez trudu jest w stanie rozróżnić detale architektoniczne – rys. 1.10) [37].

W rzeczywistości projektowej, występuje również metoda mieszana iluminacji, która może łączyć ze sobą wszystkie cechy obydwu metod [3]. Ponadto, w wyniku rozwoju źródeł liniowych opraw ze źródłami LED, w ostatnich czasach można zauważyć wyodrębnienie się trzeciej, dopiero opisywanej w literaturze, metody iluminacji – Metody Warstwowej [39]. Znajduje ona zastosowanie, wszędzie tam, gdzie w wyraźny sposób można zaakcentować horyzontalny charakter obiektu lub detalu architektonicznego i są odpowiednie warunki do montażu linii świetlnych.

Tablica 1.1. Charakterystyczne cechy dwóch głównych metod iluminacji

METOD ZALEWOWA	METODA PUNKTOWA
<ul style="list-style-type: none"> – duża spójność obrazu, – duża równomierność oświetlenia, – wysoka penetracja światła do wnętrza obiektu, – duże zagrożenie olśnieniem, – wysoka ucieczka światła w górną półprzestrzeń, – oświetlenie z dystansu (brak ingerencji w strukturę obiektu), – potrzeba wykorzystania dużej przestrzeni wokół oświetlanego obiektu, – mała liczba zastosowanego sprzętu oświetleniowego, ale o większej mocy jednostkowej, – małe nakłady inwestycyjne i konserwacyjne. 	<ul style="list-style-type: none"> – wykorzystanie większej ilości sprzętu, oświetleniowego, ale o mniejszej mocy jednostkowej, – utworzony obraz jest sumą akcentów świetlnych, – duże zagrożenie utraty spójności obrazu, który stanowi sumę akcentów świetlnych powstałych od brył fotometrycznych poszczególnych opraw, – mniejsza penetracja światła do wnętrza niż w przypadku metody zalewowej, – potrzeba ingerencji w strukturę obiektu, – potrzeba wykorzystania jedynie niewielkiej przestrzeni ograniczającej się do samego obiektu, – wysokie nakłady inwestycyjne, konserwacyjne.



Rys. 1.9. Pałac Młodzieżowski w Warszawie jako przykład iluminacji obiektu przy zastosowaniu metody zalewowej



Rys. 1.10. Pałac Potockich w Warszawie jako przykład iluminacji przy zastosowaniu metody punktowej

Ponadto, należy podkreślić, że badania w obszarze iluminacji należą do grupy stosunkowo rzadko „publikowalnej” np. w stosunku do bardzo popularnych w ostatnich latach problemów z obszaru techniki świetlnej, takich jak np. określenie nowych parametrów oddawania barw źródeł światła lub pomiary olśnienia – przykładowo [40,41,42,43]. Wynika to z tego względu, że są stosunkowo problematyczne i czasochłonne. Średni czas przygotowania projektu iluminacji od momentu zlecenia, poprzez jego wykonanie metodą

wizualizacji komputerowej, ustalenia z inwestorem, konserwatorem zabytków, zamówieniem sprzętu oświetleniowego i jego instalacją wraz z nadzorem autorskim może trwać nawet kilka lat. Doświadczenia autora niniejszej pracy w branży oświetleniowej pokazują również, że często projekt jest wykonywany, jednak w późniejszej fazie następuje decyzja o wstrzymaniu jego realizacji na czas nieokreślony lub też jej zupełne zaniechanie. Istnieje już co prawda wiele, zrealizowanych projektów. Jednak, w niektórych przypadkach trudno jest wykonywać odpowiednie, badania i niektóre precyzyjne pomiary np. przez brak szczegółowej dokumentacji projektowej projektu lub zamian na sprzęt podobny (ale nie w 100%), wykonywanych powszechnie przez firmy oświetleniowe [44]. Rozwiązaniem jest poniekąd metoda wizualizacji komputerowej koncepcji iluminacji, jednak jest ona głównie wykorzystywana przez polskich naukowców [3,4,5,45,46]. W światowej literaturze można natomiast znaleźć pozycje opisujące aspekty projektowe realizacji lub modernizacji iluminacji oraz względy estetyczne [47,48,49,50,51]. Dowodzi to potencjału naukowego związanego z kwestiami iluminacji obiektów i mnogością badań, które jeszcze nie zostały wykonane lub też problemów, które nie zostały rozwiązane. Na uwagę zasługuje na pewno fakt występowania bardzo szczegółowych wymagań projektowych związanych z iluminacją obiektów i przede wszystkim inżynierską poprawnością wykonania tego typu projektu oświetlenia [52]. Do tej pory nie powstały szczegółowe wytyczne projektowania lub też oceny. Tym nie mniej, niektóre normy i raporty techniczne, związane z instalacjami oświetlenia zewnętrznego w pewien bardzo ogólny sposób odnoszą się do kwestii iluminacji [52,53,54,55]. Jednak na podstawie restrykcyjnych kryteriów w nich zawartych należałoby zakazać iluminowania obiektów architektonicznych.

W przypadku iluminacji obiektów, inżynierską poprawność należy rozumieć przede wszystkim jako metody obiektywnej oceny lub kontroli projektu zarówno pod względem ilościowym jak i jakościowym. Jeżeli szczegółowej analizie poddawany jest jakikolwiek projekt oświetlenia (a projekt iluminacji niewątpliwie zawiera się w tym kanonie) to należy rozważać go nie tylko w ramach spełnienia pewnych kryteriów sztuki projektowej (lub normatywnych jeżeli chodzi np. o oświetlenie wnętrz), lecz również efektywności energetycznej a w ostatnich latach również zanieczyszczenia środowiska światłem. Podstawy tych dwóch istotnych w punktu widzenia ochrony środowiska zagadnień zostaną pokrótce przedstawione w dwóch następnym rozdziałach niniejszej pracy.

1.2. Efektywność energetyczna jako pojęcie pierwotne

Podstawową definicję pojęcia efektywności energetycznej można znaleźć, ograniczając się jedynie do Unii Europejskiej m.in. w następujących dokumentach prawa europejskiego:

- A) *„DYREKTYWA 2006/32/WE PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO I RADY z dnia 5 kwietnia 2006 r. w sprawie efektywności końcowego wykorzystania energii i usług energetycznych oraz uchylająca dyrektywę Rady 93/76/EWG”*, gdzie jest ono określone w następujący, dość lakoniczny sposób: *„efektywność energetyczna”*: stosunek uzyskanych wyników, usług, towarów lub energii do wkładu energii [56].
- B) ROZPORZĄDZENIE KOMISJI (UE) NR 651/2014 z dnia 17 czerwca 2014 r., gdzie jego definicja została przedstawiona w zdecydowanie innym ujęciu: *„efektywność energetyczna”* oznacza ilość zaoszczędzonej energii ustaloną w drodze pomiaru lub oszacowania zużycia przed wdrożeniem środka mającego na celu poprawę efektywności energetycznej i po jego wdrożeniu, z jednoczesnym zapewnieniem normalizacji warunków zewnętrznych wpływających na zużycie energii” [57].

Na podstawie wyżej zacytowanych definicji widać, że zagadnienie efektywności energetycznej jest wielowymiarowe. Nie dotyczy jedynie sektora energetycznego danego obszaru (państwa), lecz również jest związane z innymi gałęziami gospodarki światowej, takimi jak przemysł, handel czy usługi. Jest ono warunkowane nie tylko przez podstawowe prawa fizyczne określające pobór i zużycie energii, czy też jej zachowanie, ale też podlega pewnym aspektom ekonomicznym oraz optymalizacyjnym [58]. Istnieje wiele branż, których „problemy dnia codziennego” w bezpośredni lub pośredni sposób dotyczą efektywności energetycznej. Do najważniejszych z nich należy zaliczyć niewątpliwie: energetykę wraz z inżynierią elektryczną (w tym techniką świetlną), budownictwo, lotnictwo, ochronę środowiska itp. Wydaje się zatem, że efektywność energetyczna jest dla XXI w. tym czym na początku XX w. był postęp technologiczny, a zarazem jego naturalnym kolejnym stadium rozwoju i niewątpliwym wyzwaniem dla współczesnych naukowców oraz inżynierów.

1.2.1. Zużycie energii na potrzeby oświetleniowe

Kwestia oceny zapotrzebowanie na energię elektryczną wydaje się kluczowa dla każdego Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE) danego państwa [59]. Z tego względu istotnym wydaje się monitorowanie zużycia energii w minionych latach pracy systemu oraz prognozowanie jej potencjonalnego zużycia w latach następnych, celem przygotowania odpowiedniej polityki finansowej, zaplanowania czynności konserwacyjnych i zaplecza technicznego. Istnieje kilka instytucji międzynarodowych (np. IEA – International Energy Agency), które co roku wykonują opracowania i raporty pokazujące zapotrzebowanie i zużycie energii z podziałem na odpowiednie kategorie: sektory, branże w przeliczeniu na jedną osobę [60]. Wynika z nich, że zużycie energii elektrycznej na potrzeby oświetleniowe zarówno w sektorze publicznym, jak i prywatnym szacuje się na ok. 19%, całkowitej ilości wyprodukowanej produkcji energii elektrycznej [61]. Jest to zatem stosunkowy duży udział zużycia energii w stosunku do całej energii elektrycznej wytworzonej na świecie. Warto zatem, aby zadbać o jego minimalizację, a zarazem o wprowadzanie praktyk efektywności energetycznej do realiów projektowych i wykonawczych [62, 63]. Ponadto, z raportów wynika, że pojawienie się źródeł LED i ich szybka dominacja rynku sprzedaży oświetlenia może w znaczny sposób pomóc w ograniczeniu zużycia energii na oświetlenie. IEA utrzymuje, że w 2017 roku ok. 1/3 sprzedanych aplikacji oświetleniowych było w wykonaniu ze źródłami LED [64]. Silne nadzieje wiąże ona również ze wzrostem skuteczności świetlnej tych źródeł ze średniego poziomu rzędu 96 lm/W w roku 2017 do 144 lm/W w roku 2030 [64]. Może być to jednak złudny kierunek ze względu na liczne problemy związane z użytkowaniem tego typu lamp m.in. kwestią oceny oddawania barw, jakością wykonania (trwałość) czy też ich negatywnym wpływem na sieć elektryczną poprzez generowanie mocy biernej oraz wyższych harmonicznych prądu i napięcia [65,66,67,68].

W Polsce jedną z instytucji, dzięki której można znaleźć dane związane ze zużyciem energii w naszym kraju jest Główny Urząd Statystyczny [69]. Z danych statystycznych z lat 2015 i 2016 wynika, że zużycie energii na potrzeby oświetleniowe w Polsce w sektorze prywatnym kształtuje się na poziomie ok. 10% całkowitej produkcji energii (razem z urządzeniami elektrycznymi) oraz, że w ok. 70% przypadków w domach mieszkalnych dominują nadal źródła żarowe [69].

Wobec powyższych danych, wydaje się zatem bardzo rozsądnym podejściem, aby wszelkie instalacje oświetleniowe były wykonywane w jak najlepiej przemyślany sposób pod względem racjonalnego użytkowania energii elektrycznej (i jej efektywności).

1.2.2. Audyt energetyczny, modernizacja oświetlenia oraz prowadzone badania naukowe

W ostatnich latach można zaobserwować silne tendencje w ogólnie rozumianej branży oświetleniowej, związane z kwestią minimalizacji zużycia energii w tym sektorze. Producenci chwalą się swoją ofertą sprzętu oświetleniowego przyjaznego dla środowiska. Wykonywane są modernizacje oświetlenia, głównie oświetlenia wewnętrznego (zwłaszcza w obiektach użyteczności publicznej, obiektach biurowych) oraz oświetlenia ulicznego, czyli tych określonych jako biorących największy udział w zużyciu energii elektrycznej przeznaczonej na potrzeby oświetleniowe i charakteryzujące się największym poziomem mocy zainstalowanej.

W Polsce, na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat pojawiła się wiele dokumentów, rozporządzeń ministerialnych, traktujących o metodologii wyznaczania charakterystyk energetycznych budynków m.in. [56,57,70]. Oprócz metodologii oceny energooszczędności innych instalacji elektrycznych, jakości ocieplenia, zawarte są w nich również wytyczne związane z oświetleniem. Wykonywane są audyty oświetlenia oraz jego modernizacje, głównie polegające na wymianie opraw lub źródeł światła o wykonaniu konwencjonalnym na ich odpowiedniki, zamienniki wykonane w technologii LED. W przywołanych powyżej rozporządzeniach są zawarte informacje związane z uproszczonym audytem oświetlenia, który polega głównie na określeniu parametrów oszczędności energii elektrycznej przy założeniu, że natężenie oświetlenia powierzchni, mierzone w luksach [lm/m^2], po modernizacji spełnia wymagania Polskich Norm PN-EN 12464-1 oraz PN-EN 13201-2 (1.1) [70,71,72].

$$\Delta Q_0 = T_u(M_0 - M_1)/1000 \quad (1.1)$$

gdzie:

ΔQ_0 – ilość zaoszczędzonej energii finalnej, wyrażonej w [kWh/rok],

T_u – czas użytkowania źródła światła, wyrażony w [h/rok],

M_0 – łączna moc znamionowa zainstalowanych (starych) opraw oświetleniowych, wyrażona w [W],

M_1 – łączna moc znamionowa nowych opraw oświetleniowych po modernizacji, wyrażona w [W]

Główną miarą poprawności audytu jest tutaj rząd wielkości zaoszczędzonej dzięki modernizacji oświetlenia energii elektrycznej w ujęciu rocznym. Warto mieć na uwadze, że zmniejszenie zużycia energii elektrycznej poprzez wymianę oświetlenia na takie, które wykorzystuje technologię LED nie jest jednoznaczne z poprawą efektywności energetycznej danego obiektu. Z branży elektrycznej związanej z montażem, konserwacją instalacji elektrycznych słychać głosy, że taka modernizacja oświetlenia nie zawsze przynosi oszczędności finansowe, a w skrajnych przypadkach może nawet generować straty lub też w zły sposób oddziaływać na sieć elektryczną [67]. Jest to związane z niską niekiedy jakością sprzętu oświetleniowego LED lub też wykonaniem audytu energetycznego w niewłaściwy sposób np. nie uwzględniający brył fotometrycznych opraw oświetleniowych zainstalowanych przed modernizacją i po modernizacji (brak wykonania obliczeń fotometrycznych i pomiarów).

Ponadto, modernizacja konwencjonalnego oświetlenia na oświetlenie LED stała się tak popularna, że pojawiły się specjalne programy, fundusze, w ramach których wykonując modernizację można uzyskać specjalne środki finansowe na jej wykonanie. Jednym z przykładów takiego programu jest „SOWA – oświetlenie zewnątrz”, realizowany w ramach Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej [73]. Jest to program nastawiony, jak pokazuje praktyka realizacyjna na modernizację oświetlenia drogowego. Modernizacja oświetlenia odbywa się również przy udziale obywatelskim w ramach programu „Twój budżet – budżet partycypacyjny” m.in. miasta stołecznego Warszawy. W jego ramach, szczególna uwaga poświęcona jest bezpieczeństwu ruchu drogowego. Jak pokazuje przegląd wniosków z ostatnich kilku lat, najwięcej jest wniosków związanych z doświetleniem przejść dla pieszych.

Należy również podkreślić, że ostatnie kilkanaście lat w publikacjach naukowych z zakresu techniki świetlnej przyniosło wiele analiz poświęconych racjonalnemu użytkowaniu energii elektrycznej i praktycznie niemożliwe jest nawiązanie do każdej z nich. Tym bardziej podkreśla to stwierdzenie, że kwestia efektywności energetycznej (nie tylko oświetlenia) jest nadal bardzo istotna i dająca duże możliwości w polu badawczym [74,75,76]. Publikowane prace, poddają głównie analizie wykorzystanie energii elektrycznej na potrzeby oświetleniowe w sektorze publicznym, jak i prywatnym [77,78]. Badacze zajmują się metodami redukcji zużycia energii elektrycznej poprzez aplikację odpowiednich systemów sterowania lub też ulepszenie jakości sprzętu oświetleniowego [79]. Powstają koncepcje i realizacje budynków „prawie zero energetycznych” (*ang. nearly-zero energy building*) lub „zielonych budynków” (*ang. Green Building*), gdzie oświetlenie odgrywa ważną rolę

[80,81]. Tworzone są również systemy oceny dla potrzeb oświetlenia wnętrz oraz dróg i ulic [58]. Znajdują one zastosowanie w praktyce projektowej poprzez aplikowanie niektórych z nich do norm projektowych [63].

1.3. Zanieczyszczenie światłem środowiska – problem interdyscyplinarny

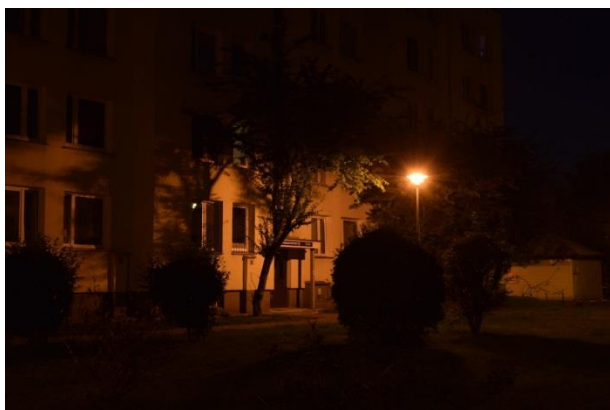
Przez ostatnie stulecie, rozwój elektrycznych źródeł światła spowodował, że coraz chętniej rozświetlamy mroki nocy [82]. Świecimy coraz więcej i coraz częściej, oświetlając nie tylko wnętrza naszych domów i miejsc pracy, lecz również tereny użyteczności publicznej takie jak ulice, drogi, parki, place i parkingi. Każdego rodzaju oświetlenie zewnętrzne ma wpływ na zjawisko zanieczyszczenia światłem środowiska (*ang. light pollution*).

Zdefiniowanie czym jest to zjawisko samo w sobie nie jest trudnym zadaniem, jednak jak dotąd nie powstała jego jedna, spójna definicja. Różne źródła definiują je w trochę inny sposób. Jednak wspólnym mianownikiem większości definicji jest określenie, że zjawisko zanieczyszczenia światłem to przede wszystkim wszelkie niepożądane skutki powstałe od pracy zewnętrznych instalacji oświetleniowych [10,83]. Niektóre definicje zanieczyszczenia światłem środowiska w bezpośredni sposób mówią o tym, że jest to zjawisko negatywne i niekorzystnie wpływające m.in. na:

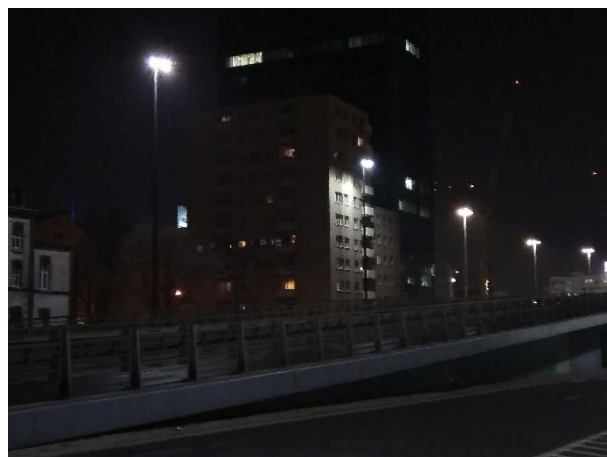
- rozjaśnienie nocnego nieboskłonu (*ang. skyglow*) np. rys. 1.11,
- zaburzenia rytmu cyrkadianego, w tym wegetację roślin, życie zwierząt,
- możliwość obserwacji ciał niebieskich,
- inicjowanie powstawania niektórych chorób,
- nieracjonalne wykorzystywanie energii elektrycznej,
- olśnienie (*ang. glare*).



Rys. 1.11. Artystyczne ujęcie zanieczyszczenia światłem w postaci zdjęcia tury świetlnej nad przykładowym górskim miasteczkiem (fot. Dariusz Bobak) [84]

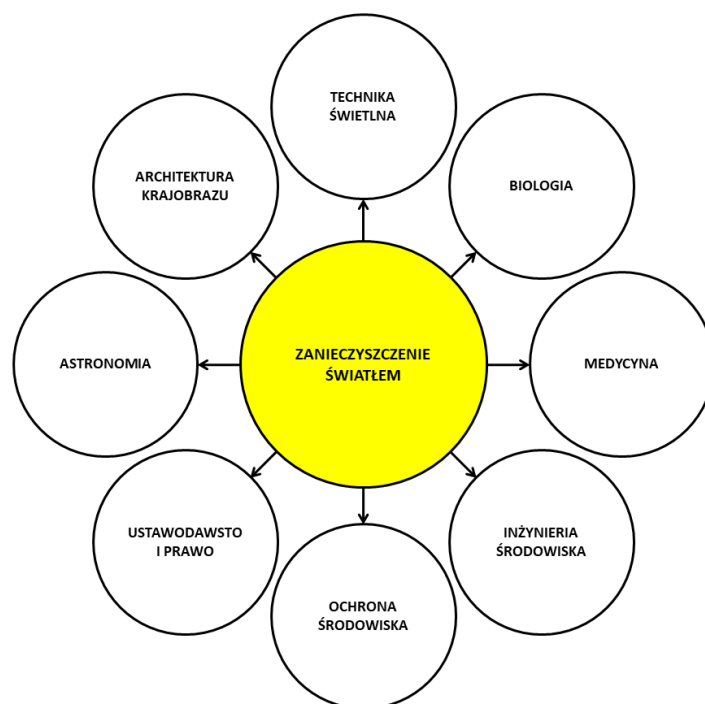


Rys. 1.12. Wnikanie światła pochodzącego od opraw oświetlenia zewnętrznego do wnętrza bloku mieszkalnego – przykład nr 1



Rys. 1.13. Wnikanie światła pochodzącego od opraw oświetlenia zewnętrznego do wnętrza bloku mieszkalnego – przykład nr 2

Ze zanieczyszczenia światłem związana jest również kwestia wyciekania światła (*ang. spill light*), którą bezpośrednim skutkiem jest intruzji światła do wnętrza obiektu. Jest to również zjawisko niepożądane i może być ono bardzo uciążliwe dla osób, które mieszkają w pomieszczeniach, których dotyczy. Przykłady tego zjawiska zostały zaprezentowane na rys. 1.12 i 1.13. Pokazują one, że niezależnie, na jakiej wysokości znajduje się okno, intruzja światła jest realnym zjawiskiem. W drugim przypadku, tak silne rozświetlenie na poziomie 10 piętra jest wynikiem potrzeby oświetlenia wiaduktu, który znajduje się bezpośrednio obok budynku. Jak widać intruzja może być spowodowana nawet potrzebą spełnienia określonych norm oświetleniowych (w tym przypadku oświetlenia drogowego) oraz nie do końca przemyślanymi decyzjami projektowymi.



Rys. 1.14. Interdyscyplinarność zjawiska zanieczyszczenia światłem środowiska

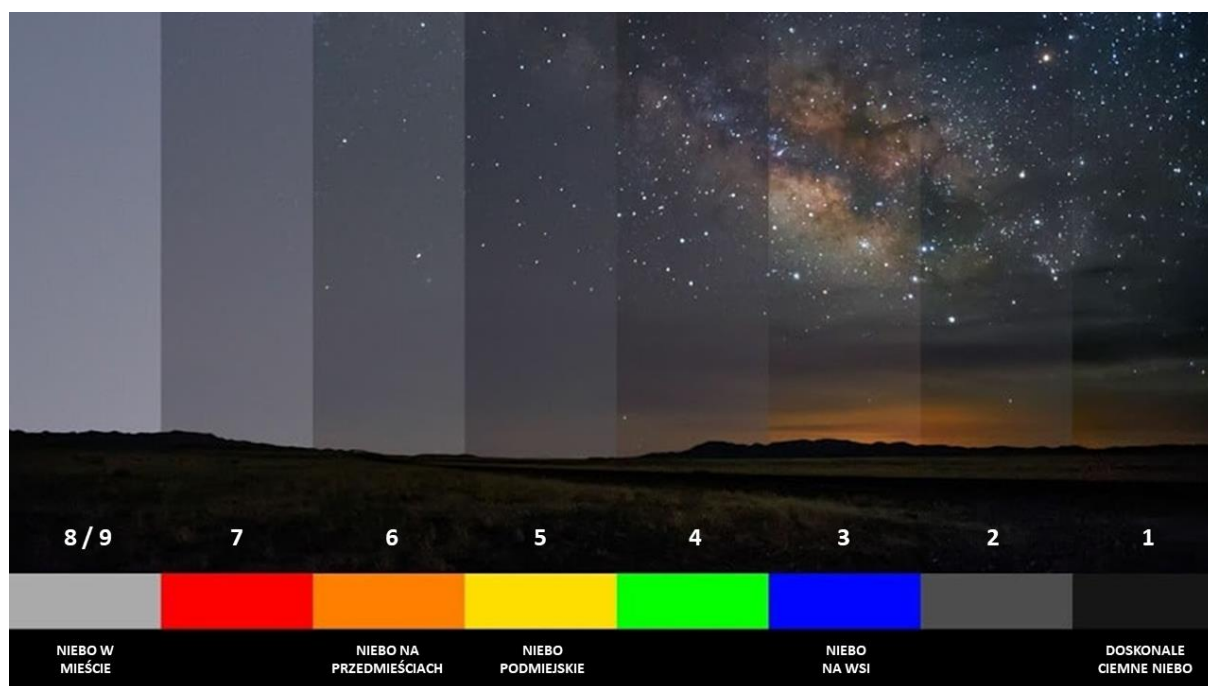
Badania z zakresu zanieczyszczenia środowiska światłem zyskały w ostatnich kilkunastu latach znaczną popularność. Dane statystyczne pokazują, że liczba publikacji w tej tematyce zwiększyła się z kilkudziesięciu rocznie w latach 2005 – 2006 do kilkuset w latach 2015 – 2016 [85]. Uwagę zwraca również fakt, że badania są prowadzone nie tylko przez inżynierów badających ilościową i jakościową naturę tego zjawiska, ale również przez biologów, astronomów, a nawet lekarzy. Wszystko to sprawia, że zjawisko zanieczyszczenia światłem urasta do rangi problemu interdyscyplinarnego – badania prowadzone są w bardzo wielu obszarach, również ekonomicznych [86]. Do najważniejszych z nich można zaliczyć:

- modelowanie i kontrola zanieczyszczenia światłem,
- pomiary zanieczyszczenia światłem i pomiarowe bazy danych,
- wpływ zanieczyszczenia światłem na organizmy żywe,
- normy i raporty techniczne związane z zanieczyszczeniem światłem, a także polityka państw względem zanieczyszczenia światłem i regulacje prawne,
- aktywności społeczne mające na celu ograniczenie zanieczyszczenia światłem.

W podrozdziałach 1.3.1–1.3.5 zostaną pokrótce omówione poszczególne obszary badań prowadzonych w zakresie zanieczyszczenia światłem środowiska oraz wnioski z nich płynące.

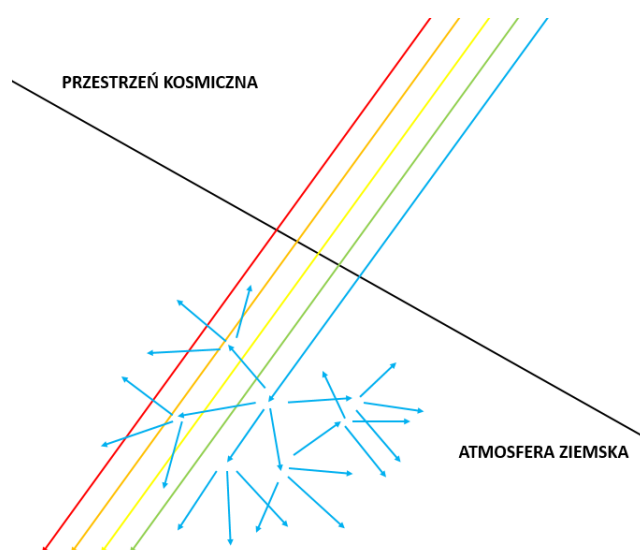
1.3.1. Modelowanie i kontrola zanieczyszczenia światłem

Mając na uwadze falową naturę światła, można powiedzieć, że jest to promieniowanie elektromagnetyczne z zakresu długości fali od 380 do 760 nm odbierane przez człowieka [87]. Ulega ono zjawiskom falowym, takim jak dyfrakcja i interferencja, odbicie, załamanie oraz rozproszenie [87]. Zanieczyszczenie światłem środowiska jest przede wszystkim związane z propagacją światła, w atmosferze ziemskiej, rozumianego jako zjawisko elektromagnetyczne. Fakt ten umożliwia matematyczne modelowanie tego zjawiska. Matematyczne modele zanieczyszczenia środowiska są tworzone przy uwzględnieniu coraz większej liczby czynników mających bezpośredni wpływ na poziom tego zjawiska. Głównym celem ich powstawania jest potrzeba uzyskania pewnych narzędzi, które mogłyby posłużyć do przewidywania zmian w zanieczyszczeniu światłem na danym obszarze, co byłoby użyteczne zwłaszcza z punktu widzenia prowadzenia obserwacji astronomicznych. Z tego punktu widzenia bardzo istotne jest istnienie możliwości jakościowego opisu ciemnego nieba. Jednym z narzędzi to umożliwiających jest skala Bortley'a (rys. 1.15). Zostało w niej określone dziewięć klas związanych z jasnością nieba w nocy. Klasa 1 oznacza doskonale ciemne niebo np. takie które występuje na terenach w żaden sposób nie zmienionych przez aktywność człowieka lub rezerwatach i parkach ciemnego nieba. Klasa 9 określa niebo bardzo zanieczyszczone przez światło, nieboskłon o dużej jasności. W takich warunkach obserwacje astronomiczne są praktycznie niemożliwe.



Rys. 1.15. Skala Bortleya oceny jakości ciemnego nieba [88]

W badaniach zanieczyszczenia światłem polegających na jego modelowaniu można spotkać się z również z problemami, które w znacznym stopniu wchodzą na zakres dotychczasowych problemów analizowanych w ramach techniki świetlnej. Czy to od strony oświetlenia dziennego – badanie wpływu rozkładu luminancji nieboskłonu na zjawisko zanieczyszczenia światłem, czy też zagadnień fotometrycznych i obliczeń oświetlenia – traktowanie modeli miast, nie jako punktowych źródeł promieniowania, lecz jako powierzchniowych [89].

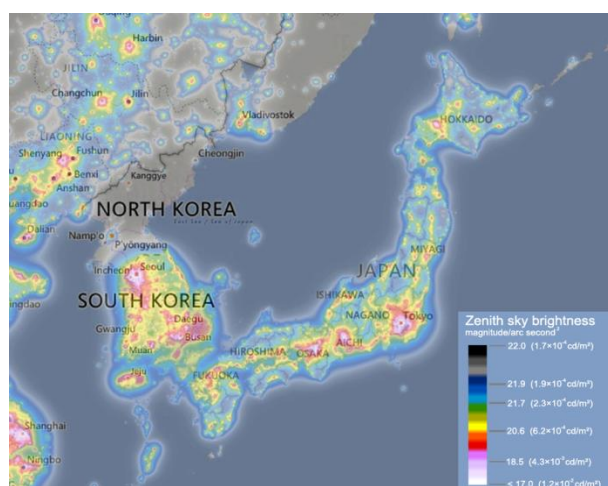


Rys. 1.16. Idea rozpraszania Rayleigha przy przejściu heterochromatycznego światła słonecznego z przestrzeni kosmicznej do atmosfery ziemskiej

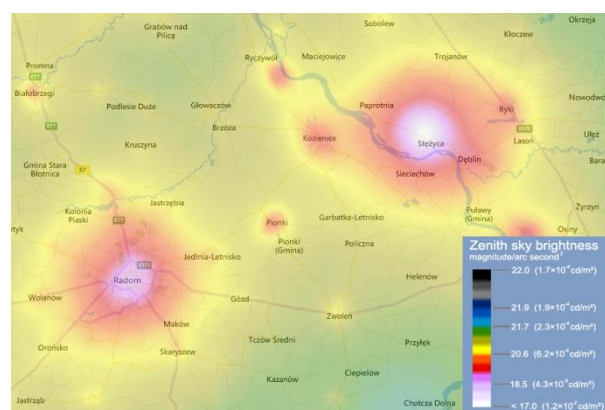
Ponadto, badacze całego świata prowadzą badania wpływu rozkładu widmowego promieniowania, które zanieczyszcza środowiska światłem [14,90]. Fakt występowania zjawiska rozpraszania Reyleigha spowodował badania wpływu zastosowanych źródeł światła w aplikacjach zewnętrznych na poziomy jasności nieboskłonu na danych obszarach. Zjawisko to polega na tym, że światło o krótszych długościach fali jest w atmosferze naszej planety rozpraszane zdecydowanie bardziej niż światło o większych jej długościach (rys. 1.16). Naukowcy porównują zatem skrajnie różne rozkłady widmowe obecnie dostępnych źródeł światła stosowanych głównie w oświetleniu ulicznym. Wynika z nich, że mimo gorszych parametrów związanych m.in. ze skutecznością świetlną źródeł światła, zdecydowanie bardziej przyjazne środowisku są lampy sodowe i metalohalogenkowe, niż tak często stosowane obecnie lampy LED [90]. Natomiast z innych badań w tym obszarze można dowiedzieć się m.in. jaki jest wpływ własności odbiciowych podłoża na zanieczyszczenie światłem na jakość ciemności nocnego nieboskłonu i poziom zanieczyszczenia światłem [91].

1.3.2. Pomiary zanieczyszczenia światłem i pomiarowe bazy danych

Dzięki rozwinięciu technologii pomiarowej i sposobów pomiaru zanieczyszczenia światłem możliwe jest również jego monitorowanie na przestrzeni lat na danym obszarze. Określa to jeden z głównych celów pomiarowych, jak również tworzy możliwości dalszego rozwoju sprzętu pomiarowego w wyniku analizy dokładności i poprawności pracy wytypowanych urządzeń w praktyce [92,93,94]. Pomiary zanieczyszczenia światłem mogą stanowić również swoistą weryfikację regulacji prawnych wprowadzanych przez poszczególne Państwa w celu ograniczenia szkodliwych efektów tego zjawiska. Jak pokazują tego typu badania naukowców przeprowadzone na przestrzeni kilkunastu lat na pewnych obszarach, po wprowadzeniu przepisów mających na celu ograniczenie „zaśmiecania” światłem, z powodzeniem udało się ograniczyć rozwój tego zjawiska [95].



Rys. 1.17. Fragment mapy świata zanieczyszczenia światłem z serwisu www.lightpollution.info – obszar Korei Północnej, Korei Południowej oraz Japonii. [96]



Rys. 1.18. Fragment mapy świata zanieczyszczenia światłem z serwisu www.lightpollution.info – obszar Polski, okolice Radomia i Dęblina [96]

Badacze zanieczyszczenia światłem, na podstawie przeprowadzanych pomiarów tworzą mapy zanieczyszczenia światłem. Jedna z nich posiada swoją interaktywną formę i funkcjonuje w Internecie w ramach strony internetowej www.lightpollutionmap.com [96]. Dzięki specjalnemu narzędziu „VIIRS” bazującemu na pomiarach satelitarnych, mapa jest co jakiś czas aktualizowana, a sam serwis umożliwia podgląd poprzednich wersji. Przykładowe fragmenty wspomnianej powyżej mapy zanieczyszczeni światłem zostały przedstawione na rysunkach 1.17 i 1.18. Poziom jasności nieboskłonu określony jest za pomocą astronomicznej wielkości określającej jasność obiektów na nieboskłonie – skali magnitudo. Jest to skala logarytmiczna i co ważne jest ona odwrotna względem skali

technicznego rozumienia jasności (luminancji) [97]. Oznacza to, że im większa jest wartość wyrażona w magintudo tym luminancja jest niższa. Przykładowo idealnie ciemne niebo charakteryzuje się wartością ok. 22 mag/arcsec², a niebo nad dużym miastem ok. 18 mag/arcsec² (wg R.L. Berry'ego) [97].

Przedstawione fragmenty mapy zanieczyszczenia światłem nie zostały wybrane w sposób losowy. Rysunek 1.17 przedstawia obszar Korei Północnej i Południowej oraz Japonii. Na podstawie analizy zanieczyszczenia światłem w tych dwóch państwach można by sądzić, że w Korei Północnej zdecydowanie bardziej dbają o nie zaśmiecanie światłem środowiska. Jednak w tym przypadku jest to raczej efekt różnicy rozwoju gospodarczego obydwu tych państw. Tak skrajny przypadek został wybrany ze względu na podkreślenie, że pomiary zanieczyszczenia światłem oraz badania przedstawiające ich monitoring na przestrzeni lat mogą mieć zastosowanie, nie tylko w inżynierii lecz również w naukach bardziej związanych z ekonomią i socjologią. Natomiast rysunek 1.18 przedstawia obszar środkowej Polski – okolice Radomia. Jak widać po skali magintudo pseudokolorów, największą jasnością nieboskłonu cechuje się Radom, który jest stosunkowo dużym miastem. Jednak w tym przypadku podobne, a nawet większe jasności występują w okolicach Stężycy, która jest miejscowością zdecydowanie mniejszą niż Radomia. W jego obrębie znajduje się jeden z większych kompleksów szklarni na terenie naszego kraju. Łuna świetlna będąca kwintesencją zanieczyszczenia światłem jest widoczna w promieniu kilkudziesięciu kilometrów. Tworzy ona takie rozjaśnienie nieboskłonu nocą, że wędkarze łowiący w dość dużych odległościach od tego miejsca (np. Łojach, Dęblinie) relacjonują, że nawet w stosunkowo mało zachmurzone noce nie trzeba używać dodatkowego sprzętu (latarek), aby wykonać niezbędne czynności związane z rybołówstwem.

1.3.3. Wpływ zanieczyszczenia światłem na organizmy żywe

W wyniku wielu badań określono, że zanieczyszczenie światłem ma istotny wpływ na rozwój organizmów żywych na naszej planecie. Nie można się temu dziwić, ponieważ stosowanie oświetlenia elektrycznego jest kwestią ostatnich 150 lat, natomiast przez poprzednie setki tysięcy lat flora i fauna przyzwyczała się do funkcjonowania w mrokach nocy. Jak pokazują badania, wpływ zanieczyszczenia światłem jest raczej negatywny. Uwidacznia się on przede wszystkim w obserwacji zachowania zwierząt, które żyją w nocy, np. mikrusów myszatyh [16]. U takich zwierząt, narażonych na promieniowanie widzialne w nocy, następuje zupełna desynchronizacja rytmu okołodobowego warunkująca

jak się okazuje ich przetrwanie w ekosystemie. Ogólnie większość ssaków nocnych, w tym nietoperzy, a także ptaków, źle reaguje z zwiększenie jasności nieboskłonu [98]. Zanieczyszczenie światłem modyfikuje ich zachowania, co uwidacznia się poprzez odmienne zachowania osobników tego samego gatunku w lasach (tereny ciemne) oraz miastach (tereny jasne) [99]. Ponadto, niektóre gatunki np. żuków, do orientacji w terenie używają położenia Drogi Mlecznej na nieboskłonie [100]. Występowanie dużego zanieczyszczenia światłem na niektórych obszarach skutecznie im to uniemożliwia.

Fauna również może źle reagować na światło w porze nocy. Ustalono, że rozkład widmowy promieniowania w znacznym stopniu ma związek z wegetacją roślin [101]. Firmy oświetleniowe produkują specjalne oprawy dedykowane np. oświetleniu szklarniowemu. W wyniku narażenia na promieniowanie w nocy, rośliny mogą rozwijać się w niewłaściwy sposób np. następuje ich zbyt duże rozmnożenie, a w efekcie niektóre zbiorniki wodne ulegają eutrofizacji [102].

Zanieczyszczenie światłem wpływa również na kształtowanie się życia i rytmu okołodobowego człowieka. Sprzyjać może to również zwiększonemu prawdopodobieństwu występowania niektórych chorób, w tym nawet chorób nowotworowych [19].

Widać zatem, że zanieczyszczenie światłem nie jest tylko wydumany problem astronomów, który nie mogą w dużych miastach dokonać obserwacji wszystkich interesujących ich ciał niebieskich. Ma ono realny wpływ na cały nasz ekosystem naturalny i to wpływ negatywny. Trzeba to jak najszybciej powstrzymać lub przynajmniej mieć pod kontrolą.

1.3.4. Normy, raporty techniczne związane z oceną zanieczyszczeniem światłem oraz polityka państw względem tego zjawiska

Problem zanieczyszczenie światłem środowiska został kilkanaście lat temu zauważony i zakwalifikowany jako problem interdyscyplinarny. Od momentu, w którym został on zauważony nastąpiła zdecydowana, szybka ekspansja badań naukowych z nim związanych. Jak zostało wspomniane w rozdziale 1.3 niniejszej pracy, liczba artykułów zarówno tych naukowych, jak i popularnonaukowych sięga kilku tysięcy na całym świecie i każdym miesiącem wzrasta. Badania, obliczenia i pomiary spowodowały, że Międzynarodowa Komisja Oświetleniowa wydała kilka raportów na temat ograniczenia emisji światła sztucznego [52,53,54]. Spowodowało to z kolei rozwinięcie w podstawowej europejskiej (i polskiej) normie związanej z projektowaniem oświetlenia podstawowego

na zewnątrz, części odnoszącej się do ograniczenia „światła przeszkadzającego” [55]. Część ta sprowadza się właściwie do dwóch tabel, w tym jedna odnosi się do instalacji oświetlenia drogowego (ta z tego względu nie zostanie tutaj przytoczona). Ze względu na pewne niedoskonałości tłumaczenia angielskiej wersji tabeli na język polski, związanej ze „światłem przeszkadzającym”, tabela została przedstawiona języku oryginału (tablica 1.2).

Tablica 1.2. Maksymalne światło przeszkadzające dla zewnętrznych instalacji oświetleniowych [55]

Environmental zone	Light on properties		Luminaire intensity		Upward light ratio	Luminance	
	E_v lx		I cd			R_{UL} %	L_b cd·m ⁻²
	Pre-curfew ^a	Post-curfew	Pre-curfew	Post-curfew	Building facade		Signs
E1	2	0	2500	0	0	0	500
E2	5	1	7500	500	5	5	400
E3	10	2	10000	1000	15	10	800
E4	25	5	25000	2500	25	25	1000

where

E1 represents intrinsically dark areas, such as national parks or protected sites;

E2 represents low district brightness areas, such as industrial or residential rural areas;

E3 represents medium district brightness areas, such as industrial or residential suburbs;

E4 represents high district brightness areas, such as town centers and commercial areas;

E_v is the maximum value of vertical illuminance on properties in lx;

I is the light intensity of each source in the potentially obtrusive direction in cd;

R_{UL} is the proportion of luminous flux of luminaire(s) that is emitted above the horizontal, when the luminaire(s) is (are) mounted in its (their) installed position and attitude, and given in %;

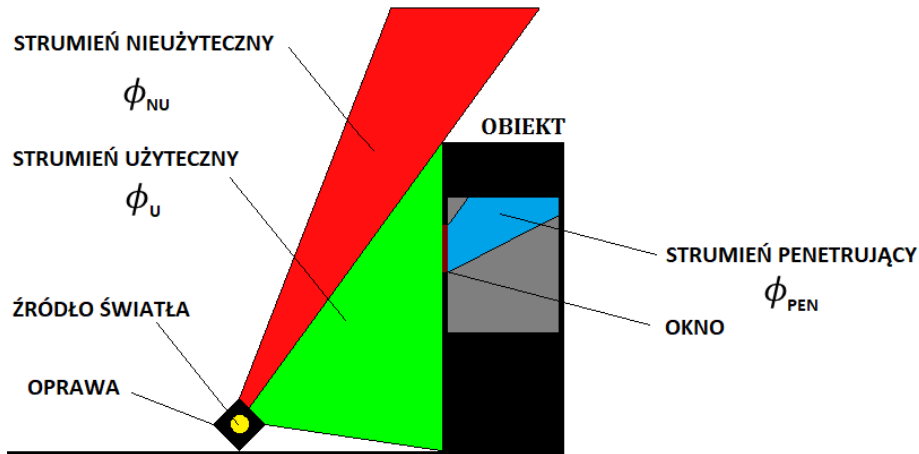
L_b is the maximum average luminance of the facade of a building in cd·m⁻²;

L_s is the maximum average luminance of signs in cd·m⁻².

a) In case no curfew regulation are available, the higher values shall not be exceeded and the lower values should be taken as preferable limits.

Norma EN 12464–2 podaje, że „weryfikację instalacji oświetleniowej należy wykonać przez pomiary, obliczenia lub sprawdzenie danych”. Wszystkie parametry związane ze światłem przeszkadzającym powinny zostać określone przez projektanta oświetlenia w odniesieniu do specyfikacji projektowej. Weryfikacja E_v , L_b i L_s , powinna zostać przeprowadzona na podstawie pomiarów. Jednak występuje tu kilka nieścisłości i niedopowiedzeń. np. w jaki sposób przeprowadzić pomiary natężenia oświetlenia

– po zewnętrznej czy po wewnętrznej stronie okien? Zdroworozsądkowa praktyka pomiarowa techniki świetlnej podpowiada, że po wewnętrznej, jednak nie jest to w normie w precyzyjny sposób napisane. Określenie światłości również nie jest ujednoczone, tak samo w jaki sposób przeprowadzać pomiary luminancji. Nie doprecyzowane jest również zakres obiektów, dla których wymagania normatywne i kryteria projektowe związane ze światłem przeszkadzającym miałyby obowiązywać – czy są to wszystkie obiekty, czy tylko te zamieszkałe? Ponadto, fakt że we wszystkich strefach występują tak niskie referencyjne wartości dla parametru R_{UL} , sprawia że realizacja iluminacji obiektu jest praktycznie niemożliwe do wykonania, pod względem spełnienia tego kryterium. Należało by stosować oświetlenie od góry do dołu (obiektu oświetlone w ten sposób są bardzo rzadko spotykane), które z powodzeniem umożliwiają dostosowanie się do wymagań normy (rys. 1.20) [7]. Nie zmienia to jednak faktu, że w zdecydowanej większości przypadków, sytuacja oświetleniowa w iluminacji obiektów wygląda, tak jak to pokazano na rys. 1.19 (w praktyce 1.21), a jej opis strumieniowy wywodzący się z zasady zachowania energii przedstawia zależność (2.1). Wydaje się zatem, że omawiana norma nie uwzględnia przypadku iluminacji obiektu, co z resztą w żaden sposób nie jest w niej konkretnie określone.



Rys. 1.19. Typowa sytuacja oświetleniowa w iluminacji obiektów

$$\Phi_{op} = \Phi_0 \eta_{op} = \Phi_u + \Phi_{nu} + \Phi_{pen}(\rho, \tau) [lm] \quad (2.1)$$



Rys. 1.20. Iluminacja galerii handlowej na warszawskim Wilanowie, jak przykład odwrócenia typowego kierunku oświetlenia w iluminacji obiektów – oświetlenie „górną-dół”



Rys. 1.21. Przykład użytecznego (pomnik) i nieużytecznego (przestrzeń dookoła) efektu działania wiązki świetlnej (fot. Sławomir Zalewski)

Ponadto, bardzo chwalebne są informacje napływające z całego świata, a związane z próbami ograniczenia zanieczyszczenia światłem poprzez odpowiednie akty prawne np. na Tajwanie i w Korei Południowej [103,104]. Są one sankcjonowane przez organy do tego specjalnie wyznaczone i upoważnione do nakładania stosownych kar finansowych. Jednak na podstawie rozmów autora niniejszej pracy przeprowadzonych na kilku konferencjach międzynarodowych oraz znając realia polskiego przemysłu oświetleniowego, przepisy związane z ograniczeniem zanieczyszczenia światłem wydają się martwe, nie tylko w Polsce, lecz również w innych krajach europejskich. Dla przykładu, na Słowenii funkcjonuje przepis, który mówi że średnia luminancja oświetlanej elewacji nie może przekraczać 1 cd/m^2 , co w przypadku zachowania norm związanych z oświetleniem drogowym (średnia luminancja nawierzchni jezdni w klasie M1: $L \geq 2 \text{ cd/m}^2$) wydaje się po prostu bardzo niepraktyczne i nieprzemysłane.

Należałoby zatem przygotować odpowiednie, przemyślane kryteria projektowe związane z zanieczyszczeniem światłem, które w jasny sposób określałyby różne przypadki oświetleniowe w iluminacji obiektów i klasyfikowałyby je jako wykonane z wysoką dbałością o redukcję zanieczyszczenia światłem inne jemu sprzyjające.

Należy również wspomnieć, że w literaturze pojawiają się próby wprowadzania pewnych parametrów oceny [105]. Jednak nie zostały one do tej pory uznane, jako przydatne w procesie projektowym iluminacji obiektów.

1.3.5. Aktywności społeczne ograniczające zanieczyszczenie światłem

Przy omawianiu problemu zanieczyszczeniu światłem środowiska warto również wspomnieć o tym, że nie jest on jedynie zarezerwowany dla środowisk naukowych. Na całym świecie powstają organizacje i fundacje, których głównym celem jest dbanie o uświadomienie społeczeństwa o wadze, przyczynach i skutkach tego problemu [106]. Dzięki większej świadomości wśród ludzi, którzy na co dzień nie zajmują się ani techniką świetlną ani astronomią możliwa jest redukcja niepożądanego promieniowania emitowanego w niebo, które powiększa jego jasność w nocy.

Jedną z takich organizacji założonych w Polsce jest stowarzyszenie POLARIS–OPP z siedzibą w Sopotni Wielkiej [107]. Działa ono w obszarze samorządowym, szkolnictwa a nawet techniki. Jest to najstarsza taka organizacja w naszym kraju. W 2004 roku uruchomiła ona program pt. „Ciemne Niebo”[108]. Jego podstawowe cele to m.in.:

- nawiązywanie porozumień z lokalnymi władzami w sprawie ochrony ciemnego nieba przed nadmierną emisją światła sztucznego,
- ewidencja obszarów chronionych,
- pozyskiwanie funduszy na realizację przyjaznych ochronie ciemnego nieba instalacji oświetleniowych a nawet wymiana szkodliwych instalacji na nowe,
- promocja idei ciemnego nieba w mediach.

Kolejnym projektem organizacji POLARIS – OPP jest „Zacznij ściemniać – ochrona przed zanieczyszczaniem sztucznym światłem, czyli zaczynamy od własnego podwórka” [109]. Projekt ten opiera się głównie na bogato ilustrowanym folderze promowanym przez członków stowarzyszenia na licznych konferencjach i astronomicznych spotkaniach. Zawarte w nim zostały najważniejsze, podstawowe informacje na temat zanieczyszczenia światłem, a także grafiki pokazujące (zdaniem jego autorów) prawidłowe i nieprawidłowe sposoby oświetlenia danych obiektów. Folder na pewno stanowi ciekawą propozycję informacyjną dla przeciętnego człowieka. Przykładem może być rys. 1.22, na którym pokazany został „prawidłowy” i „nieprawidłowy sposób” iluminacji obiektu. Ogólna idea, którą można odczytać z tego rysunku jest jak najbardziej słuszna i w bezpośredni sposób związana z tematyką niniejszej rozprawy doktorskiej. Jednak osoba mająca już pewne doświadczenie w technice świetlnej bez trudu dostrzeże bardzo niską merytoryczną jakość tego opracowania, związaną z użyciem niepoprawnej terminologii uwidaczniających się na przykład w opisie zawartym na wspomnianym rysunku (np. strumień światła zamiast strumień świetlny).



Rys. 1.22. Przykład prawidłowego i nieprawidłowego sposobu iluminacji zawartego z folderze projektu „Zacznij ściemniać” [109]

Ponadto, na terenie naszego kraju działa również kilka parków ciemnego nieba. Jednym z nich jest „Izerski Park Ciemnego Nieba”, funkcjonujący nieprzerwanie od 4 listopada 2009 [110]. Powstał on w wyniku projektu realizowanego przez Instytut Astronomiczny Uniwersytetu Wrocławskiego z osobami z uczelni czeskich. Park zlokalizowany jest w południowo–zachodniej Polsce, w dolinach rzek Izerka oraz Izerka i ma obszar 75 km². Jest to miejsce, w którym organizuje się wiele spotkań astronomicznych. Osoby odpowiadające za jego powstanie prowadzą również działalność edukacyjną pt. „Wygasz. Innowacyjny projekt badania zanieczyszczenia światłem w województwie dolnośląskim przy udziale uczniów i nauczycieli szkół średnich.” [111]. W ramach tego projektu młodzież licealna może uczestniczyć w warsztatach astronomicznych, interesując się zarówno kwestią zanieczyszczenia światłem środowiska, jak i wykonywaniem samych obserwacji, a także pracy badawczej.

1.4. Podsumowanie

Informacje przedstawione w całym tym rozdziale mogą stanowić jedynie wprowadzenie do zagadnień, takich jak: iluminacja obiektów architektonicznych, efektywność energetyczna oświetlenia oraz zanieczyszczenie światłem. Większość problemów oraz aspektów z nimi związanych, a przedstawiona w sposób ogólny w niniejszej pracy, miała na celu podkreślenie jak bardzo są one złożone, trudne w odbiorze, rozwiązaniu i przede wszystkim ujednoczeniu. Uwagę na pewno zwraca fakt, że projekt iluminacji to przecież po prostu projekt inżynierski. Jednak w przeciwieństwie do innych projektów tego typu (jak choćby projekt oświetlenia ulicy) nie jest on do tej pory zobowiązany żadnymi kryteriami oprócz zalecenia luminancyjnego [52]. Jest ono jednak zazwyczaj nieprzestrzegane ze względu na brak procedur, które mogłyby go zweryfikować. Ponadto, zastanawiające jest również dlaczego iluminacja obiektów nie doczekała się do tej pory żadnych inżynierskich kryteriów projektowych, a fakt realizacji tego typu projektów nie jest ujęty w jakikolwiek sposób w żadnym opracowaniu normatywnym. Zwłaszcza że źle zaprojektowane lub wykonane oświetlenie iluminacyjne może w znaczący sposób wpływać na środowisko naturalne poprzez zanieczyszczenie światłem, co jest w bezpośredni sposób związane ze stratami energii elektrycznej, a w końcu z kwestią ochrony środowiska. Wydaje się, że brak jakichkolwiek wytycznych projektowych, regulacji, norm, narzędzi i metod oceny, jak również popularność omawianych w tym rozdziale zagadnień sprawiają, że odniesienie kwestii efektywności energetycznej i zanieczyszczenia światłem do iluminacji jest jak najbardziej odpowiednim tematem badań naukowych.

2. OKREŚLENIE PROBLEMU NAUKOWEGO, TEZY I CELU PRACY

2.1. Kwestia inżynierskiej oceny projektu iluminacji

Badając iluminację obiektów, uwidacznia się brak narzędzi i parametrów związanych z analizą ilościową tego zagadnienia. Jak dotąd projekty oraz realizacje projektów iluminacji są oceniane tylko jakościowo na podstawie subiektywnej wizji projektanta (lub inwestora, lub konserwatora zabytków) oraz jego poczucia estetyki. Sprawia to, że projekty są (zazwyczaj) piękne wizualnie, ale niewidomo, czy są tak samo dobrze wykonane pod względem wykorzystania przez ich instalację oświetleniową energii elektrycznej. Kwestia efektywności energetycznej oświetlenia iluminacyjnego nie była to tej pory analizowana, czy to ze względu na sprawność oświetlenia czy też minimalizację mocy urządzeń oświetleniowych przy pewnych założeniach fotometrycznych. Uwidacznia się również brak narzędzi i metod kontroli zanieczyszczenia światłem środowiska od iluminacji obiektów. Pierwszy problem naukowy, cel i tezę pracy związane z kwestią inżynierskiej oceny projektu iluminacji można sformułować w następujący sposób:

PROBLEM NAUKOWY 1:

Badanie efektywności energetycznej i zjawiska zanieczyszczenia światłem w iluminacji obiektów.

CEL PRACY 1:

Określenie nowych użytecznych parametrów technicznych odnoszących się do kwestii efektywności energetycznej i zjawiska zanieczyszczenia środowiska światłem w iluminacji obiektów, a także metod ich obliczeń w odniesieniu do różnych obiektów architektonicznych.

TEZA PRACY 1:

Istnieje możliwość oceny oraz ilościowej kontroli efektywności energetycznej i zanieczyszczenia środowiska światłem w iluminacji obiektów.

2.2. Kwestia ulepszania projektu iluminacji

Zdefiniowanie narzędzi, parametrów i metody ilościowej oceny projektu iluminacji może spowodować potrzebę ulepszenia projektu zarówno pod względem poprawy efektywności energetycznej, jak i redukcji zanieczyszczenia światłem środowiska. Konieczne zatem wydaje się odpowiedzenie na pytania:

- jakie są metody ulepszania projektu iluminacji pod względem efektywności energetycznej i zanieczyszczenia światłem?
- czy poprawa projektu iluminacji pod względem efektywności energetycznej i zanieczyszczenia środowiska światłem może powodować zmiany w pierwotnej koncepcji oświetlenia danego obiektu?
- na ile dopuszczalne są zmiany w pierwotnej koncepcji iluminacji obiektu po zastosowaniu ulepszenia projektu iluminacji i w jaki sposób to wartościować?

Drugi problem naukowy, cel i teza niniejszej pracy związane z kwestią ulepszania projektu iluminacji kształtują się następująco:

PROBLEM NAUKOWY 2:

Badanie związku szczegółowego rozwiązania iluminacji z jej efektywnością energetyczną, zjawiskiem zanieczyszczenia światłem środowiska i efektem estetycznym.

CEL PRACY 2:

Ustalenie w jaki sposób można dokonywać czynności poprawiających wartości nowych parametry inżynierskiej oceny projektu iluminacji pod względem efektywności energetycznej i zanieczyszczenia światłem bez konieczności wprowadzania zmian w pierwotnej koncepcji iluminacji danego obiektu.

TEZA PRACY 2:

Istnieje możliwość ulepszenia efektywności energetycznej projektu iluminacji i redukcji zanieczyszczenia światłem od niego powstałego bez konieczności wprowadzania istotnych zmian efektu estetycznego.

3. NOWE PARAMETRY OCENY EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ I ZANIECZYSZCZENIA ŚWIATŁEM ŚRODOWISKA W ILUMINACJI OBIEKTÓW

3.1. Definicja sprawności iluminacji

Sprawność oświetlenia to jeden z podstawowych parametrów techniki oświetlania. Klasyczna definicja tego parametru odnosi się do wnętrza (oraz ulic) i określa go jako iloraz całkowitego strumienia świetlnego, który dociera do płaszczyzny roboczej oraz strumienia świetlnego wszystkich źródeł światła w danym pomieszczeniu Φ_0 [112, 113]. Jak podaje literatura, na parametr ten ma wpływ bardzo wiele czynników, takich jak: bryła fotometryczna, sprawność i rozmieszczenie zastosowanych opraw oświetleniowych, geometria pomieszczenia, wielkość i pozycja płaszczyzny roboczej, współczynniki odbicia głównych powierzchni oraz pozostałych elementów pomieszczenia [112,113]. Stanowi on istotny element przy ocenie ilościowej oświetlenia danego wnętrza, drogi lub ulicy oraz efektywności energetycznej oświetlenia danego typu [58]. Mimo, że sprawność oświetlenia jest ważnym parametrem, poddawany analizie przez naukowców, nie została do tej pory zaimplementowana do oświetlenia architektonicznego. Wydaje się to być dobrym pomysłem ze względu na dotychczasowy brak wymagań ilościowych dla tego typu oświetlenia, oprócz zaleceń zawartych w raporcie CIE z 1993r., związanych z wymogiem uzyskiwania określonego poziomu średniej luminancji [52]. Klasyczną definicję sprawności oświetlenia można w stosunkowo łatwy sposób przekształcić na definicję jednoznacznie związaną z iluminacją obiektów:

Sprawność iluminacji (η_{il}) – (*ang. Floodlighting Utilisation Factor*) to stosunek całkowitego strumienia świetlnego użytecznego Φ_u , który dociera bezpośrednio do powierzchni iluminowanego obiektu i wywołuje określone wrażenia wzrokowe w postaci rozkładu luminancji poszczególnych powierzchni oraz całkowitego strumienia świetlnego wszystkich źródeł światła Φ_{t0} zainstalowanych we wszystkich oprawach oświetleniowych zastosowanych w danym projekcie iluminacji Φ_{0i} [114].

$$\eta_{il} = \frac{\Phi_u}{\Phi_{t0}} \cdot 100 [\%] \quad (3.1)$$

$$\Phi_{t0} = \sum_{i=1}^n \Phi_{0i} [lm] \quad (3.2)$$

Również w tym przypadku, przewiduje się, że pewne czynniki (oświetleniowe i poza oświetleniowe) będą miały istotny wpływ na wartość nowozdefiniowanego parametru. Mogą to być m.in: kształt bryły fotometrycznej i wycelowanie oprawy oświetleniowej, jej odległość od oświetlanego obiektu, zastosowana metoda iluminacji czy też styl architektoniczny (geometria) iluminowanego obiektu. Przed przystąpieniem do prac i badań nad systemem oceny efektywności energetycznej i zanieczyszczenia światłem w iluminacji obiektów, postanowiono zatem najpierw określić, w jaki sposób zachowuje się ten parametr dla pojedynczej oprawy oświetleniowej. Wykonano również próby określenia sprawności iluminacji dla obiektów ze stosunkowo nowo zrealizowaną instalacją iluminacyjną. Wyniki przeprowadzonej wstępnej analizy obliczeniowej oraz pomiarowej, zostaną przedstawione w dwóch podrozdziałach 3.1.1 i 3.1.2.

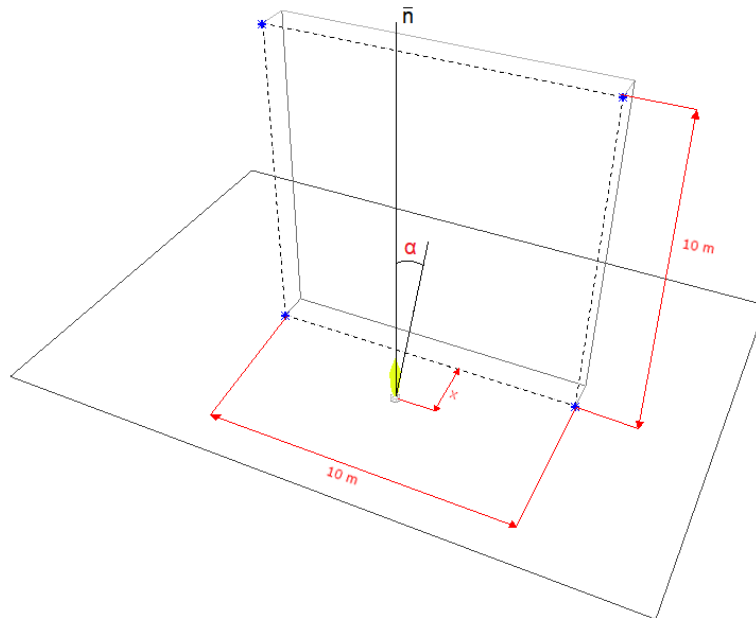
3.1.1. Wstępne obliczenia sprawności iluminacji

Obliczenia sprawności iluminacji dla pojedynczych opraw oświetleniowych zostały wykonane w programie DIALux 4.12. Model obliczeniowy składał się z podłoża, prostopadłej ściany o wymiarach 10 x 10 m oraz oprawy oświetleniowej zlokalizowanej przed nią (rys. 3.1). Analizie zostały poddane rozkłady natężenia oświetlenia uzyskane na powierzchni oświetlanej ściany w wyniku zastosowania opraw oświetleniowych w następujących przypadkach:

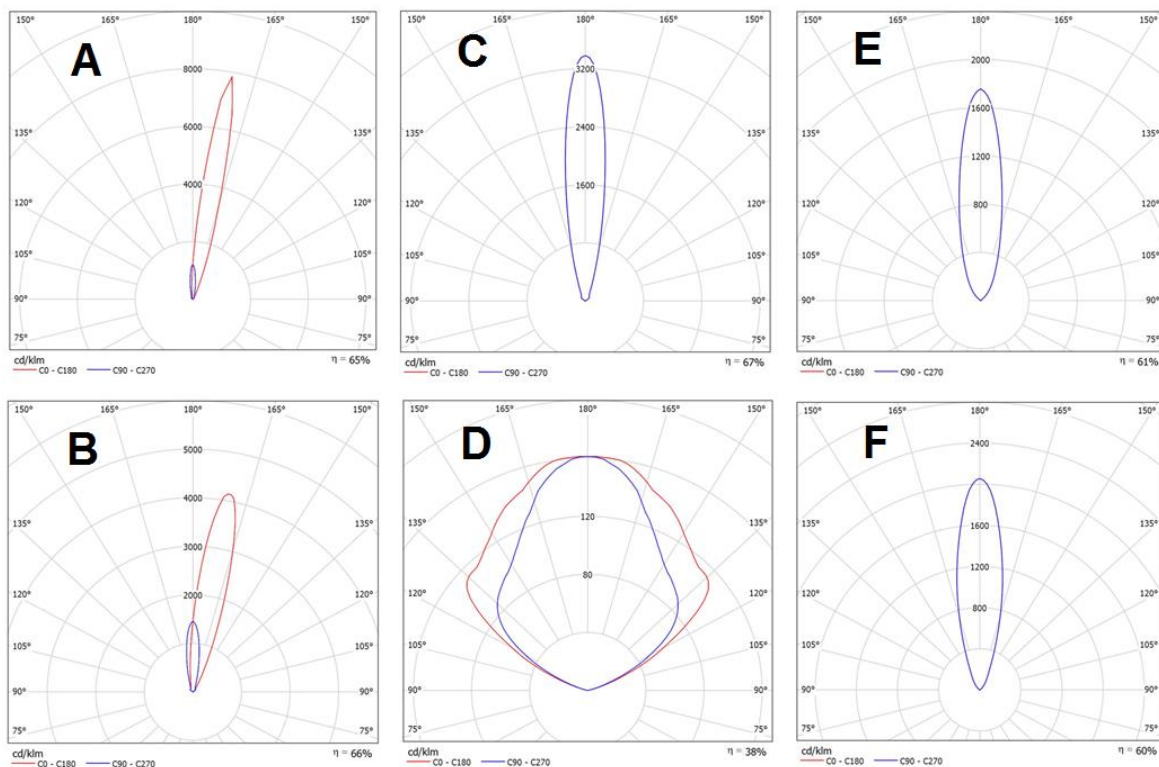
- różne bryły fotometryczne opraw oświetleniowych doziemnych o podobnej mocy i strumieniu świetlnym (rys. 3.2), przy tej samej odległości od ściany i tym samym kącie wycelowania,
- różne odległości oprawy od ściany (0,5m, 1,0m, 2,0m), przy tej samej bryle fotometrycznej oprawy i tym samym kącie wycelowania,
- różne kąty wycelowania opraw oświetleniowych (odchylenie od 0° do 25° od osi pionowej z korkiem co 5°) przy tej samej bryle fotometrycznej i tej samej odległości od ściany.

Obliczenia zostały wykonane dla przypadku braku zjawiska odbić wielokrotnych (składowa bezpośrednia natężenia oświetlenia). Określenie oczka siatki obliczeniowej odbyło się na podstawie wcześniejszej analizy dokładności obliczeniowej programu DIALux oraz realiów działania ludzkiego narządu wzroku [114]. Uznano, że oczko siatki obliczeniowej o wymiarach 0,25 x 0,25 m (160 punktów obliczeniowych na całej oświetlanej powierzchni),

pozwoła w tym przypadku uzyskać zadowalającą dokładność wyników – dalsze zmniejszania oczka siatki obliczeniowej nie miało istotnego wpływu na wyniki uzyskanego rozkładu natężenia oświetlenia. Następnie został obliczony strumień świetlny użyteczny oraz sprawność iluminacji dla każdej analizowanej sytuacji oświetleniowej. Uzyskane wyniki zostały przedstawione w tablicach 3.1 i 3.2 oraz graficznie na rys. 3.3 i 3.4.



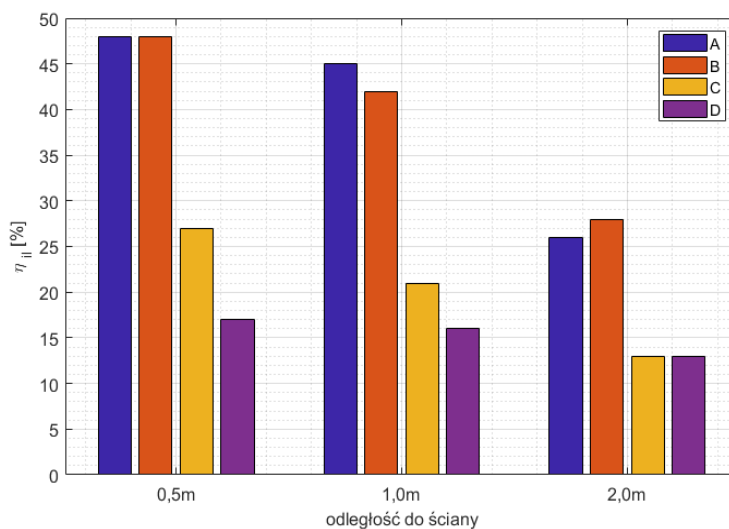
Rys. 3.1. Układ obliczeniowy do badania sprawności iluminacji pojedynczych opraw oświetleniowych zamodelowany w programie DIALux



Rys. 3.2. Krzywe światłości opraw oświetleniowych, dla których zostały wykonane obliczenia sprawności iluminacji – oprawy doziemne (A–D), oprawy doziemne z nachylonym układem optycznym (E–F) [114]

Tablica 3.1. Wyniki obliczeń sprawności iluminacji dla opraw A–D

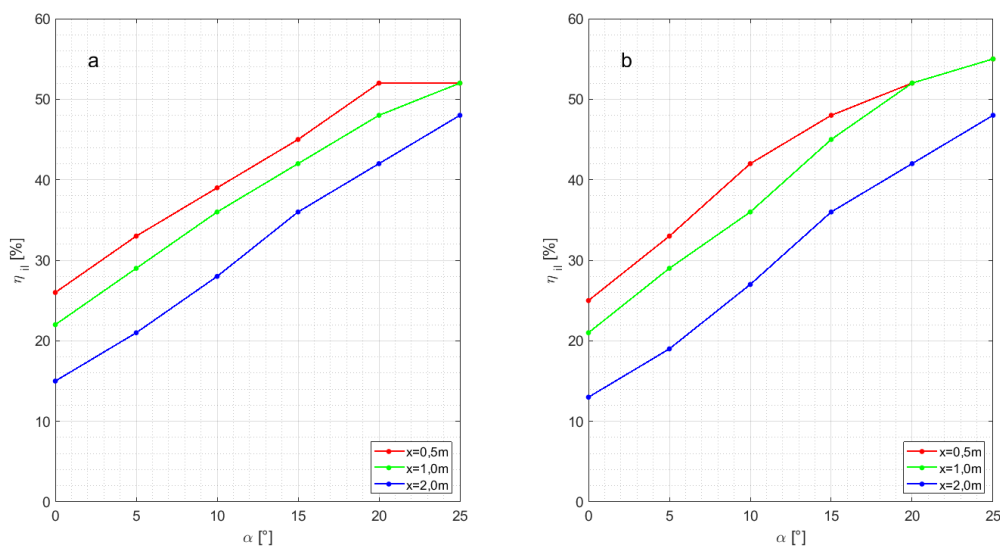
Oprawa	Φ_0 [lm]	η_{op} [%]	Φ_{op} [lm]	x [m]	η_{il} [%]
A	3300	65	2145	0,5	48
				1,0	45
				2,0	26
B	3300	66	2178	0,5	48
				1,0	42
				2,0	28
C	3300	67	2211	0,5	27
				1,0	21
				2,0	13
D	1800	38	684	0,5	17
				1,0	16
				2,0	13



Rys. 3.3. Zmiana wartości parametru sprawności iluminacji dla opraw typu: A,B,C,D w zależności od odległości od oświetlanej ściany

Tablica 3.2. Wyniki obliczeń sprawności iluminacji dla opraw E–F [114]

Oprawa	Φ_0 [lm]	η_{op} [%]	Φ_{op} [lm]	α [°]	η_{il} [%]		
					$x = 0,5m$	$x = 1,0m$	$x = 2,0m$
E	3300	60	1980	0	26	22	15
				5	33	29	21
				10	39	36	28
				15	45	42	36
				20	52	48	42
				25	52	52	48
F	3300	66	1980	0	25	21	13
				5	33	29	19
				10	42	36	27
				15	48	45	36
				20	52	52	42
				25	55	55	48



Rys. 3.4. Zmiana wartości parametru sprawności iluminacji w funkcji kąta wycelowania: a – oprawa typ E, b – oprawa typ F

Wyniki obliczeń sprawności iluminacji, przeprowadzonych dla pojedynczych opraw oświetleniowej, spowodowały określenie następujących wniosków (mając na uwadze ich słuszność w kontekście oświetlenie architektonicznego):

- rodzaj bryły fotometrycznej, odległość oprawy oświetleniowej od oświetlanej powierzchni oraz kąt wycelowania oprawy mają duży wpływ na wartość sprawności iluminacji,
- dobór rozbieżności użytecznej rozsyłu światłości danej oprawy oświetleniowej powinien być uwarunkowany geometrią oświetlanej powierzchni. W analizowanym przypadku najmniejsze wartości sprawności iluminacji zostały uzyskane dla oprawy o szerokim rozsyłu światłości (D), natomiast zdecydowanie większe dla rozsyłów wąskich i asymetrycznych (A–C),
- dla wszystkich przebadanych opraw (A–D) można zaobserwować zmniejszenie wartości sprawności iluminacji wraz ze zwiększeniem odległości od oświetlanej powierzchni, niezależnie od rodzaju bryły fotometrycznej,
- nachylenie oprawy oświetleniowej (E–F) w stronę oświetlanej powierzchni powoduje zwiększenie wartości parametru sprawności iluminacji,
- maksymalna wartość sprawności iluminacji jest ograniczona przez sprawność oprawy oświetleniowej – idealną sytuacją wydaje się więc taka, w której sprawność iluminacji danego rozwiązania oświetleniowego jest zbliżona do wartości sprawności oprawy.

Na podstawie analizowanego przypadku trudno jest oczywiście dokonać swoistego rodzaju ujednoczenia. Jednak możliwe jest określenie pewnych tendencji, które w odniesieniu do pojedynczych opraw oświetleniowych mogą znajdować swoje odzwierciedlenie w przypadku projektu iluminacji, gdzie liczba opraw oświetleniowych jest zdecydowanie większa. Analizując obliczone, stosunkowo niskie sprawności oświetlenia dla pojedynczych opraw iluminacyjnych (rzędu 30%), tym bardziej uwidacznia się potrzeba określenia pewnego narzędzia (systemu oceny), które pozwoli zapanować na kwestią efektywności energetycznej, jak również zanieczyszczenia światłem w iluminacji obiektów.

3.1.2. Pomiary sprawności iluminacji

Pierwsza i jedyna do tej pory (według wiedzy autora) próba określenia sprawności oświetlenia w iluminacji obiektów nastąpiła w 2006 roku w ramach pracy magisterskiej pt. „Badanie sprawności oświetlenia w iluminacji obiektów” wykonanej pod kierunkiem pana profesora Wojciecha Żagana w Zakładzie Techniki Światłnej Politechniki Warszawskiej [25]. Badania opierały się na pomiarach średniej luminancji zrealizowanego projektu iluminacji. Znając powierzchnię oświetlanego obiektu, na podstawie prostych przekształceń definicji natężenia oświetlenia (3.3) i jego związku luminancją (3.4) dla odbicia lambertowskiego można obliczyć strumień świetlny użyteczny (3.5). Średnią wartość luminancji oświetlanego obiektu otrzymuje się przez pomiar przy wykorzystaniu miernika luminancji punktowego lub matrycowego. Mając na uwadze trudność tego typu pomiarów, należy zadbać o dostatecznie dużą dokładność pomiarową (wiele punktów pomiarowych dla miernika punktowego lub rozsądne wykorzystanie technologii matrycowej) [44,115]. Powierzchnię oświetlanego obiektu można z dużą dokładnością ustalić na podstawie rzutów architektonicznych wykonanych np. w programie AutoCAD.

$$E = \frac{d\Phi}{dS} [lx] \quad (3.3)$$

$$L = \frac{\rho E}{\pi} \left[\frac{cd}{m^2} \right] \quad (3.4)$$

$$\Phi_u = \frac{\pi L_{sr} S}{\rho} [lm] \quad (3.5)$$

Efektom zaskoczenia w podsumowaniu pomiarów i obliczeń zawartych w tej pracy, było to, że poziom sprawności oświetlenia w przypadku iluminacji może być tak niski (od 8% do 34%). W celu zwiększenia wiarygodności otrzymanych wyników a także zyskania doświadczenia w tego typu obszarze pomiarowym, zaistniała więc potrzeba wykonania ponownie podobnych badań. Niewystarczająca i podważalna jakość wyników pomiarów i obliczeń w przypadku określonego wcześniej źródła mogła wynikać m.in. z jakości wykonania pracy dyplomowej, niezadbania o odpowiednie warunki pomiarowe (temperatura otoczenia, temperatura pracy miernika, eliminacja wpływu oświetlenia zewnętrznego od innych instalacji oświetleniowych np. oświetlenia ulicznego), sprzęt pomiarowy, wykonanie pomiarów po długim czasie eksploatacji danej instalacji iluminacyjnej.

Do pomiarów sprawności iluminacji zostały wytypowane dwa obiekty, które spełniały warunki niezbędne do wykonania tego typu badań:

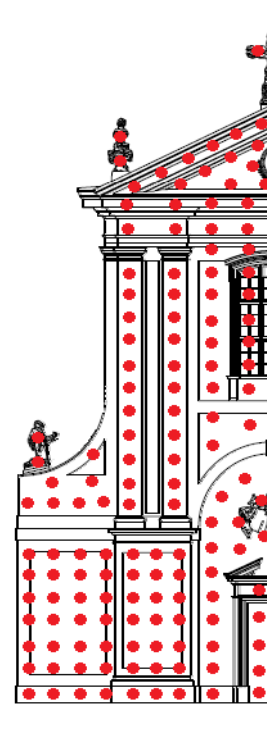
- zdecydowana większość elewacji odbija światło w sposób rozproszony,
- ich instalacja iluminacyjna została wykonana stosunkowo niedawno (przyjęto okres około roku od pierwszego uruchomienia),
- dostępne są dokładne dane techniczne związane z zastosowanym sprzętem pomiarowym oraz rzuty architektoniczne elewacji,
- możliwy jest dostęp do posesji obiektów w porze nocy,
- obiekt nie jest za bardzo przysłonięty przez okoliczne obiekty oraz roślinność, co ułatwi wykonanie pomiarów luminancji,
- możliwe jest wyłączenie instalacji iluminacyjnej, w celu określenie wpływu światła pochodzącego od innych instalacji oświetleniowych lub zlokalizowany jest w miejscu gdzie takie oświetlenie nie występuje.



Rys. 3.5. Zdjęcie porealizacyjne iluminacji Centrum Weterana w Warszawie (fot. Krzysztof Skarżyński)[44]



Rys. 3.6. Zdjęcie porealizacyjne iluminacji kościoła Poreformackiego w Węgrowie (fot. Krzysztof Skarżyński)[44]



Rys. 3.7. Przykładowe rozmieszczenie punktów pomiarowych na fragmencie rzutu fasady kościoła Poreformackiego w Węgrowie [44]

Wszystkie warunki niezbędne zaprezentowane powyżej udało się całkowicie spełnić dla dwóch obiektów: Centrum Weterana w Warszawie (rys 3.5) oraz kościoła Poreformackiego w Węgrowie (rys. 3.6). Dla obydwu przypadków pomiary luminancji zostały wykonane w kilkudziesięciu (kilkuset) punktach na powierzchni całej elewacji (przykładowe rozmieszczenie rys. 3.7) za pomocą mierników luminancji firmy Konica–Minolta. Ze względu na zlokalizowanie Centrum Weterana w dużym mieście i aby wyeliminować wpływ oświetlenia ulicznego w tym przypadku, dokonano pomiarów różnicowych. Średnia luminancja danej iluminacji L_{il} jest różnicą średniej luminancji dla włączonej instalacji iluminacyjnej L_{on} i średniej luminancji wyłączonej instalacji iluminacyjnej L_{off} (4.6). Takiej potrzeby nie było dla kościoła Poreformackiego w Węgrowie ze względu na jego położenie na terenach wiejskich (oraz jego otoczenie wysokim parkanem). Współczynnik odbicia elewacji ρ został zmierzony zgodnie z zasadami sztuki, a powierzchnia elewacji S określona na podstawie otrzymanych rzutów architektonicznych w programie AutoCAD [44]. Zestawienie sprzętu oświetleniowego zastosowanego dla poszczególnych obiektów znajduje się w tablicy 3.3, a wyniki pomiarów i obliczeń sprawności iluminacji w tablicy 3.4.

$$L_{il} = L_{on} - L_{off} \left[\frac{cd}{m^2} \right] \quad (3.6)$$

Tablica 3.3. Zestawienie sprzętu oświetleniowego zastosowanego w realizacjach poszczególnych iluminacji wytypowanych do pomiarów sprawności iluminacji [44]

L.p.	Typ	Rozsył	Liczba	Typ źródła	T_c [K]	P_0 [W]	P_{op} [W]	Φ_0 [lm]	Φ_{op} [lm]	η_{il} [%]
Kościół Poreformacki w Węgrowie										
1.	doziemna	osiowo –symetryczny	2	MH	3000	35	39	3200	1440	45
2.	doziemna	osiowo –symetryczny	2	MH	3000	70	82	6600	2970	45
3.	doziemna	obrotowo –symetryczny	2	MH	3000	35	48	3300	2211	67
4.	liniowa	Osiowo –symetryczny	4	LED	3000	–*	30	1760	1496*	85*
5.	liniowa	osiowo –symetryczny	4	LED	3000	–*	18	1200	1020*	85*
		SUMA:	14							
Centrum Weterana w Warszawie										
1.	doziemna	asymetryczny	8	MH	4000	35	45	3700	2172	59
2.	doziemna	asymetryczny	8	LED	3000	19,8	24	1835	1297	71
3.	reflektorowa	osiowo –symetryczny	2	MH	4000	70	85	7800	3557	46
		SUMA:	18							

*brak danych lub wartość wyznaczona za pomocą pomiarów laboratoryjnych

Tablica 3.4. Zestawienie wyników obliczeń sprawności iluminacji uzyskanych na podstawie pomiarów [44]

OBIEKT	P_0 [kW]	Φ_{top} [lm]	Φ_{t0} [lm]	S [m ²]	ρ [–]	$L_{il} \left[\frac{cd}{m^2} \right]$	Φ_u [lm]	η_{il} [%]
CENTRUM WETERANA	0,53	41969	56056	370	0,28	2,4	10070	18
KOŚCIÓŁ POREFORMACKI	0,72	23306	38040	300	0,60	16,1	31538	47

Średni poziom luminancji obiektu Centrum Weterana wynosi około 2,5 cd/m². Biorąc pod uwagę lokalizację obiektu w centrum dużego miasta (strefa E4) oraz typowe zalecenia związane z średnią luminancją iluminacji, można uznać że ta wartość jest zdecydowanie za niska [52]. Wydaje się, że w tych warunkach jasności otoczenia, zakładaną wartością luminancji średniej iluminacji powinno być ok. 9–10 cd/m². Dodatkowo na niekorzyść rezultatów projektu świadczy fakt, że jej poziom jest podobny do poziomu średniej luminancji nawierzchni jezdni, co sprawia że trudno mówić tutaj o wyróżnieniu

obiekty poprzez piękną iluminację z otoczenia. Zastanawiająca jest również niska sprawność iluminacji, wynosi ona zaledwie 18%. Dopiero gdyby w tym przypadku udało się ją zwiększyć pięciokrotnie (do 90%), średnia luminancja obiektu wynosiła by ok. 9 cd/m^2 , co by było już bardziej zgodne z zasadami sztuki iluminacji. Jest to jednak rozważanie teoretyczne, ponieważ sprawność poszczególnych opraw oświetleniowych zastosowanych w tym projekcie nie pozwala na osiągnięcie tak wysokiego poziomu sprawności iluminacji. Zwiększenie średniej luminancji projektu pokazano jedynie jako efekt związany ze zwiększeniem parametru sprawności iluminacji.

Ponadto, na podstawie tak niskiej wartości iluminacji uzyskanej w tym projekcie (18%) można wnioskować, że instalacja iluminacyjna dla tego obiektu została wykonana niedbale lub w nieodpowiedni sposób. Zdecydowana większość strumienia świetlnego pochodzącego z opraw oświetleniowych nie trafia w przeznaczone do oświetlenia powierzchnie obiektu, a jedynie rozprasza się w przestrzeni warunkując zanieczyszczenie środowiska światłem. Efektywność energetyczna tego rozwiązania iluminacji jest zatem dość niska.

Średni poziom luminancji fasady głównej kościoła Węgrowie wynosi około 20 cd/m^2 . Wedle zaleceń CIE jest to wartość zbyt duża (biorąc pod uwagę położenie kościoła). Jednak większą wartość tego parametru można tłumaczyć dużym znaczeniem obiektu pod względem pełnionej funkcji w sferze sacrum. Sprawność iluminacji w tym przypadku jest zdecydowanie większa i wynosi 47%. Pod tym względem ten projekt iluminacji wypada zdecydowanie lepiej, jednak należy zadać pytanie czy ten parametr jest wystarczający, aby tylko na jego podstawie mogło nastąpić porównanie projektów iluminacji? Można wyobrazić sobie teoretyczną sytuację, w której oba porównywane projekty iluminacji charakteryzują się dokładnie taką samą wartością parametru sprawności iluminacji, wartością średnią luminancją, a nawet podobną całkowitą mocą czynną wszystkich zastosowanych opraw oświetleniowych, jednak różnią się sprawnościami poszczególnych opraw i poziomem uzyskanego strumienia użytecznego. Istnieje zatem potrzeba wprowadzenia jeszcze innych parametrów, które w jednoznaczny sposób pozwolą dokonywać inżynierskiej oceny projektu iluminacji, a także porównywać je między sobą pod względem efektywności energetycznej i zanieczyszczenia środowiska światłem.

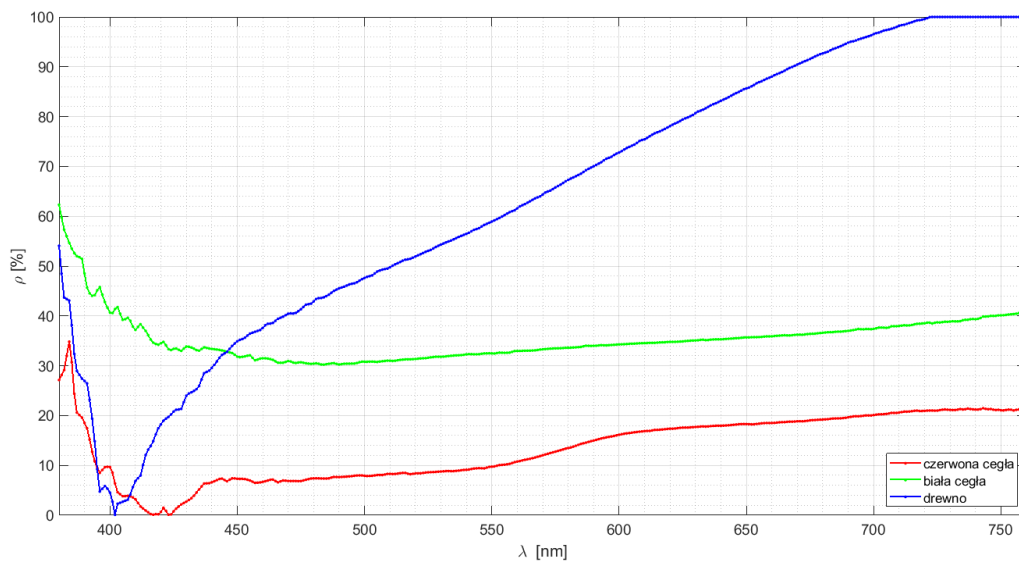
Wykonane pomiary sprawności iluminacji, utwierdziły autora w przekonaniu, że rząd wielkości wartości sprawności iluminacji jest stosunkowo niski (ok. 30%) oraz że występuje wiele czynników, które mają na niego wpływ. Poszukiwanie i kontynuacja prac nad systemem przeznaczonym dla potrzeb iluminacji wydaje się jak najbardziej uzasadnione.

3.2. Wpływ rozkładu widmowego źródła światła na efektywność energetyczną iluminacji

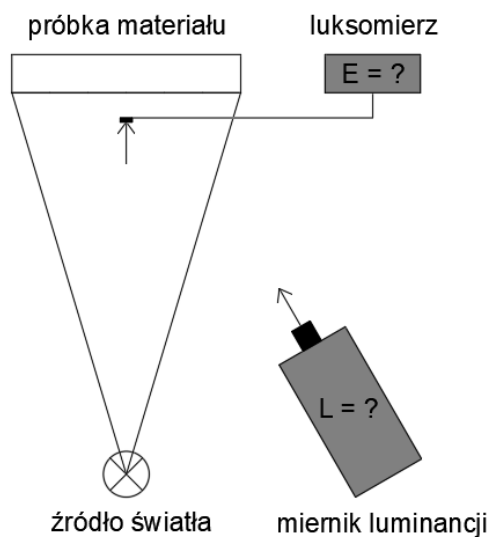
Jak powszechnie wiadomo, w przypadku odbicia dyfuzyjnego całkowity współczynnik odbicia materiału zależy zarówno od rozkładu widmowego współczynnika odbicia materiału, jak i rozkładu widmowego źródła światła, którym go oświetlamy [116]. Rozkład widmowy współczynnika odbicia jest zależny od rodzaju materiału. Przykładowo jedne materiały mogą bardziej odbijać promieniowanie bliższe promieniowaniu z zakresu podczerwieni lub nadfioletu, a inne mniej. Przykładowe rozkłady widmowego współczynnika odbicia, dla cegły czerwonej, białej i drewna, zostały przedstawione na rys. 3.8. Zostały one sporządzone na podstawie pomiaru klasycznym reflektometrem wykorzystującym metodę Taylora, przy zastosowaniu, zamiast miernika fotoprądu, głowicy spektrometriu.

W toku analizy problemu postanowiono zbadać, czy oświetlanie danego materiału za pomocą źródeł światła o różnym rozkładzie widmowym będzie powodować znaczące zmiany wartości całkowitego współczynnika odbicia, a w efekcie będzie wpływać na efektywność energetyczną iluminacji. W tym celu przeprowadzono doświadczenie pomiarowe (rys. 3.9.). Dla wspomnianych wcześniej trzech typowych materiałów budowlanych (rys. 3.10.) zostały wykonane pomiary luminancji oraz natężenia oświetlenia w tych samych punktach przy oświetleniu próbek różnymi źródłami światła: lampą metalohalogenkową o barwie 4200K i 3000K, lampą LED o barwie 3000K i 4000K oraz wysokoprężną lampą sodową. Następnie przekształcając prostą zależność charakteryzującą odbicie dyfuzyjne – związku luminancji z natężeniem oświetlenia został obliczony całkowity współczynnik odbicia dla poszczególnych przypadków (3.7). Zestawienie wyników obliczeń całkowitego współczynnika odbicia zostało przedstawione w tablicy 3.5.

$$\rho = \frac{L\pi}{E} [-] \quad (3.7)$$



Rys. 3.8. Rozkład widmowego współczynnika odbicia badanych materiałów [117]



Rys. 3.9. Schemat układu pomiarowego



Rys. 3.10. Materiały, dla których został wyznaczony widmowy rozkład współczynnika odbicia; od lewej: czerwona cegła, biała cegła, drewno [117]

Tablica 3.5. Wyniki obliczeń całkowitego współczynnika odbicia dla wytypowanych materiałów [117]

ŹRÓDŁO ŚWIATŁA	CZERWONA CEGŁA	BIAŁA CEGŁA	DREWNO
MH 4200K	11	38	29
MH 3000K	11	32	31
LED 2700K	12	36	29
LED 4000K	11	30	27
SON	13	36	32

Jak widać na podstawie uzyskanych wyników, różnica całkowitego współczynnika odbicia dla poszczególnych materiałów względem różnych źródeł światła są stosunkowo niewielkie – nie przekracza 10%. Mogłoby się wydawać, że nie ma to większego wpływu na efektywność energetyczną iluminacji, jednak jest inaczej. W tablicy 3.6, zostały przedstawiona analiza mająca na celu pokazanie ile potrzeba by było sztuk źródeł światła różnego typu o mocy 150W, aby wytworzyć typowy poziom średniej luminancji w iluminacji (12cd/m^2) dla wartości całkowitego współczynnika odbicia z tablicy 3.5. Powierzchnia 300m^2 została uznana za typową powierzchnię iluminacji obiektu o średnich gabarytach. Strumień świetlny użyteczny został obliczony na podstawie zależności (3.5) a dla poszczególnych lamp zostały przyjęte typowe wartości strumienia świetlnego poszczególnych źródeł światła. Obliczenia zostały wykonane przy założeniu, że cały strumień świetlny ze źródeł światła dociera do powierzchni przeznaczonej do oświetlenia. Jest to niewątpliwie uproszenie, jeżeli chodzi o geometrię przecinania się płaszczyzny obiektu z płaszczyznami brył fotometrycznych opraw oświetleniowych, jednak pozwoli to pokazać różnice w liczbie opraw w oświetlaniu danego materiału elewacji danym typem źródła światła.

Tablica 3.6. Wyniki obliczeń liczby niezbędnych źródeł światła dla wytypowanych przypadków [117]

ŹRÓDŁO ŚWIATŁA	η [lm/W]	LICZBA ŹRÓDEŁ ŚWIATŁA		
		CZERWONA CEGŁA	BIAŁA CEGŁA	DREWNO
MH 4200K	90	7	2	3
MH 3000K	100	7	3	3
LED 2700K	110	6	2	3
LED 4000K	110	6	2	2
SON	140	4	2	2

Na podstawie uzyskanych wyników widać, że różnice dla skrajnych przypadków wynoszą zaledwie kilku sztuk źródeł światła. Należy jednak pamiętać, że dla projektu iluminacji każde kolejne źródło światła lub oprawa oświetleniowa to większa cena jego realizacji – sprzęt iluminacyjny dobrej jakości jest stosunkowo drogi. Tak więc można

zauważyć, że w przypadku białej cegły bardziej opłaca oświetlać się ją lampami sodowymi, w przypadku czerwonej cegły lepiej nie używać lamp metalohalogenkowych o temperaturze barwowej 3000K, a w przypadku drewna najbardziej efektywne energetycznie oświetlenie uzyskamy stosując LEDy o barwie 4000K oraz lampy sodowe. Powyższe rozważania zostały przeprowadzone z pominięciem efektu estetycznego, który przecież w tego typu oświetleniu odrywa rolę nadrzędną. Tym nie mniej mówiąc o efektywności energetycznej iluminacji należy mieć na uwadze powyższy eksperyment.

3.3. Inne parametry oceny efektywności energetycznej i zanieczyszczenia światłem

Oprócz parametru sprawności iluminacji, do oceny efektywności energetycznej oraz zanieczyszczenia światłem od projektu iluminacji, w którym zostało zastosowane wiele opraw oświetleniowych różnych typów, przydatne są również inne parametry:

- maksymalna sprawność iluminacji,
- wskaźnik wykorzystania maksymalnej sprawności iluminacji,
- energetyczna sprawność iluminacji,
- luminancja średnia obiektu iluminacji,
- przewymiarowanie luminancji.

Parametry te w bezpośredni sposób mówią o efektywności energetycznej iluminacji obiektów, a także odnoszą się do zanieczyszczenia światłem. Definicje niektórych z nich (3.8 i 3.12) zaprezentowane poniżej dostępne są już w literaturze i kształtują się następująco [118]:

Maksymalna sprawność iluminacji (η_{max}) – (ang. *maximum floodlighting utilisation factor*) stosunek całkowitego strumienia pochodzącego od wszystkich opraw oświetleniowych zastosowanych w projekcie Φ_{top} (3.9). do całkowitego strumienia świetlnego pochodzącego od ich wszystkich źródeł światła Φ_{ot} (3.2).

$$\eta_{max} = \frac{\Phi_{top}}{\Phi_{ot}} \cdot 100 [\%] \quad (3.8)$$

$$\Phi_{top} = \sum_{i=1}^n \Phi_{opi} [lm] \quad (3.9)$$

W praktyce oznacza to, że dla iluminacji, w której została wykorzystana tylko jedna oprawa oświetleniowa, maksymalna sprawność iluminacji η_{max} jest taka sama co do wartości jak sprawność tej oprawy η_{op} (3.10). Natomiast w przypadku iluminacji, w której zostało wykorzystanych wiele, różnych opraw oświetleniowych, maksymalna sprawność iluminacji będzie średnią ważoną z wartości sprawności zastosowanych opraw η_{opi} , gdzie jako wagi należy przyjąć liczbę zastosowanych opraw danego typu MN (3.11). Parametr ten charakteryzuje projekt iluminację pod względem jakości zastosowanego sprzętu oświetleniowego. Im większą wartość on posiada, tym lepszej jakości sprzęt oświetleniowy został zastosowany – straty w układzie optycznym są małe, co w pozytywny sposób może wpłynąć na pozytywną ocenę efektywności energetycznej tego projektu iluminacji.

$$\eta_{max} = \eta_{op} \quad (3.10)$$

$$\eta_{max} = \frac{\sum_{i=1}^n MN_i \eta_{opi}}{\sum_{i=1}^n MN_i} [\%] \quad (3.11)$$

Wskaźnik wykorzystania maksymalnej sprawności iluminacji (ww_{il}) – (ang. *coefficient of floodlighting utilisation factor*) stosunek uzyskanej sprawności iluminacji dla danego rozwiązania oświetlenia do maksymalnej sprawności iluminacji tego projektu (3.12). Ten parametr mówi z kolei o potencjale energetycznym projektu. Im jest on wyższy, tym lepsze wykorzystanie energii potrzebnej co iluminacji całego projektu. Zakres wartości tego parametry kształtuje się w przedziale od 0 do 100%. 100% oznacza, że cały strumień świetlny z wszystkich opraw oświetleniowych zastosowanych w projekcie dociera do powierzchni przeznaczonych do oświetlenia – co w praktyce oznacza, że iluminacja zaprojektowana w ten sposób nie wpływa w negatywny sposób na zanieczyszczenie światłem środowiska.

$$ww_{il} = \frac{\eta_{il}}{\eta_{max}} \cdot 100 [\%] \quad (3.12.)$$

Energetyczna sprawność iluminacji (η_{en}) – (ang. *floodlighting energy utilisation factor*) procentowa wartość iloczynu maksymalnej sprawności iluminacji oraz sprawności iluminacji uzyskanej dla danego rozwiązania oświetleniowego (3.13). Parametr ten w bezpośredni sposób odnosi się do efektywnego wykorzystania mocy zainstalowanej w danej koncepcji iluminacji.

$$\eta_{en} = \frac{\eta_{il}\eta_{max}}{100} [\%] \quad (3.13.)$$

Luminancja średnia obiektu iluminacji ($L_{\acute{s}r}$) – (ang. *average luminance of floodlighting object*) jest to parametr, który w bezpośredni sposób odnosi się do definicji iluminacji [116]. Do tej pory, jako jedyny był wykorzystywany do ilościowej oceny projektu iluminacji, poprzez określenie charakterystycznych poziomów (4, 6 lub 12 cd/m²) [52]. Dotychczas był on analizowany jedynie w sposób organoleptyczny z uzyskanego rozkładu luminacji danego projektu iluminacji. Jednak dzięki znajomości strumienia świetlnego Φ_u , średniego współczynnika odbicia elewacji obiektu $\rho_{\acute{s}r}$ oraz wielkości jej powierzchni S , można go w prosty sposób obliczyć korzystając z zależności (3.14).

$$L_{\acute{s}r} = L_u = \frac{\rho_{\acute{s}r}\Phi_u}{\pi S} \left[\frac{cd}{m^2} \right] \quad (3.14)$$

Można wyróżnić dwie różne wartości luminancji średniej: luminancję zalecaną L_z oraz luminancję uzyskaną L_u . Luminancja zalecana odnosi się do poziomu jasności, na który jest projektowana dana iluminacja. Jej wartości zostały określone w raporcie technicznych CIE i wynoszą odpowiednio 4, 6 lub 12 cd/m² [52]. Odpowiedni poziom przyjmuje się w zależności od jasności otoczenia świetlnego z zależnością: im większa jasność otoczenia, tym większy poziom luminancji średniej danego obiektu iluminacji. Oznacza to, że np. na terenach miejskich (stosunkowo duża jasność otoczenia) powinno się przyjąć jako wartość luminancji zalecanej L_z na poziomie 12 cd/m², natomiast na terenach wiejskich (stosunkowo mała jasność otoczenia) 4 cd/m². Natomiast luminancja uzyskana L_u , to ta, która powstała w wyniku zastosowania określonego rozwiązania oświetleniowego w iluminacji danego obiektu. Jest ona możliwa do obliczenia dla każdego rozwiązania na poziomie projektowym (a także do zmierzenia po realizacji) poprzez skorzystanie z wzoru (3.14).

Przewymiarowanie luminancji (L_p) – (ang. *oversizing luminance*) jest to wartość stosunku luminancji uzyskanej L_u i luminancji zalecanej L_z (3.15). Parametr ten jest bardzo istotny, ze względu na fakt, iż w bezpośredni sposób jest on związany z efektywnością energetyczną danego rozwiązania iluminacyjnego. Dzięki określeniu jego wartości osoba projektująca oświetlenie może w precyzyjny sposób określić jakim poziomem średniej luminancji charakteryzuje się zaprojektowana iluminacja. Daje to możliwość korekcji mocy

(strumienia świetlnego) opraw oświetleniowych zastosowanych w projekcie zgodnie z zależnością (3.16). Odbywa się to poprzez zastosowanie odpowiedniego systemu sterowania (ściemniania) lub wymianę opraw na takie o mocy (strumieniu świetlny) większym/mniejszym względem uzyskanego przewymiarowania luminancji.

$$L_p = \frac{L_u}{L_z} [-] \quad (3.15)$$

$$L_p \begin{cases} > 1 \rightarrow \text{korekcja mocy opraw } L_p - \text{krotnie} \\ = 1 \rightarrow \text{brak korekcji mocy opraw} \\ < 1 \rightarrow \text{korekcja mocy } 1/L_p - \text{krotnie} \end{cases} \quad (3.16)$$

Podany w zależności przypadek $L_p = 1$ jest w dużym stopniu wyidealizowany. W praktyce projektowej przewiduje się raczej uzyskiwanie wartości większych lub mniejszych od 1. Należy również mieć na uwadze pewną racjonalność stosowania opisanej powyżej korekcji mocy względem przewymiarowania luminancji. Dla przykładu, jeżeli wartość luminancji uzyskanej L_u jest tylko nieznacznie większa od wartości luminancji zalecanej L_z , a uzyskany efekt wizualny jest poprawny zgodnie z przyjętym kanonem zasad iluminacji, można nie wykonywać korekcji mocy. Tak samo jest w przypadku, gdy wartość luminancji uzyskanej L_u jest tylko nieznacznie mniejsza od wartości luminancji zalecanej L_z . Ze względu na obecny brak szczegółowych badań w tym obszarze, wydaje się, iż dobrą interpretacją pojęć „nieznacznie większa” oraz „nieznacznie mniejsza” będzie odniesienie się do psychofizycznego prawa Webera–Fechnera, mówiącego o relacji fizycznej miary bodźca (w tym przypadku wrażenia wzrokowego) i reakcji zmysłu (wzroku) [119]. Wynika stąd zatem, że akceptowalna różnica wartości luminancji uzyskanej L_u względem wartości luminancji zalecanej L_z , nie powinna być większa niż 15 – 20%.

3.4. Metody obliczeń sprawności iluminacji (i pozostałych paramentów)

3.4.1. Założenia ogólne obliczeń

Zdefiniowane w podrozdziałach 3.1 i 3.2 parametry są możliwe do obliczenia na poziomie projektowym przy wykorzystaniu oprogramowania dającego możliwość analizy rozkładu natężenia oświetlenia na płaszczyznach obliczeniowych. Wydaje się, że ze względu na swoją użyteczność w procesie projektowym iluminacji obiektu oraz wystarczającą precyzję obliczeniową, program Autodesk 3ds MAX jest odpowiedni do wykonania obliczeń zdefiniowanych parametrów [120]. W programie dostępna jest funkcja Light Meter [121]. Umożliwia ona obliczenie rozkładu natężenia oświetlenia na zadanej płaszczyźnie obliczeniowej. Wartości natężenia oświetlenia obliczane są na niej zadaną przez użytkownika dokładnością w poszczególnych punktach obliczeniowych. Co więcej, powierzchnię obliczeniową Light Meter można w dowolny sposób modyfikować – zmieniać jej rozmiar, wyginać i ustawiać względem oświetlanego obiektu. Daje to bardzo duże możliwości stworzenia różnych metod obliczeń. Wszystkie z nich opierają się na analizie rozkładu natężenia oświetlenia lub luminancji na danej powierzchni. Znając wielkość tej (tych) płaszczyzn można obliczyć strumień świetlny, który do nich dociera. Tę ogólną zależność przedstawia formuła (3.17).

$$\phi = \int_s E ds [lm] \quad (3.17.)$$

Po obliczeniu wartości strumienia świetlnego docierającego do wszystkich zastosowanych płaszczyzn, można uzyskać wartości zarówno strumienia użytecznego, jak i nieużytecznego. To która wartość strumienia zostanie uzyskana zależy od sposobu rozmieszczenia powierzchni obliczeniowych względem oświetlanego obiektu. Metody obliczeń sprawności iluminacji można zatem podzielić na metodę obliczeń strumienia użytecznego i metodę obliczeń strumienia nieużytecznego [120]. Każda nich posiada kilka własnych wariantów. Jest to oczywiście związane z wadami i zaletami poszczególnych konfiguracji. Ważne jest natomiast, że niezależnie od wyboru metody obliczeń, można uzyskać wszystkie zdefiniowane parametry inżynierskiej oceny projektu iluminacji.

3.4.2. Obliczenia strumienia użytecznego

Można wyróżnić dwie metody obliczeń strumienia użytecznego: Metodę wzrokowej oceny luminancji średniej oraz Metodę elewacyjną [120].

Metoda wzorkowej oceny luminancji średniej – jest to jedyny przypadek, gdy nie trzeba zastosować powierzchni obliczeniowej Light Meter. Luminancja średnia projektu iluminacji jest wyznaczana na podstawie wzrokowej oceny rozkładu luminancji wygenerowanego w skali pseudokolorów w programie komputerowym (lub podczas pomiaru matrycowym miernikiem luminancji). Znając tak określoną wartość luminancji średniej oraz pole powierzchni oświetlanych elewacji obiektu, można z łatwością obliczyć strumień użyteczny z wzoru (3.18) a następnie pozostałe parametry oceny.

$$\phi_u = \frac{\pi L_{sr} S}{\rho} [lm] \quad (3.18.)$$

gdzie:

L_{sr} – luminancja średnia,

S – pole powierzchni elewacji obiektu (powierzchnia pozorna),

ρ – współczynnik odbicia powierzchni.

Metoda ta jest bardzo szybka do zastosowania i była stosowana do tej pory w celu oceny poprawności wielkości średniej luminancji, na którą została zaprojektowana dana iluminacja. Charakteryzuje się jednak niewielką dokładnością, spowodowaną głównie subiektywnością oceny średniej wielkości luminancji uzyskanej z analizy jej rozkładu w skali pseudokolorów. Do określenia rzędu wielkości luminancji średniej jest odpowiednia, jednak określenie dokładnej wartości jest praktycznie niemożliwe do uzyskania podczas jej zastosowania. Ze tego względu, ten wariant nie będzie poddany dalszej analizie.

Metoda elewacyjna – metoda ta polega na nałożeniu powierzchni obliczeniowej Light Meter na oświetlany obiekt (jego elewację) (rys. 3.11). Nałożenie tej powierzchni odbywa się poprzez zostawianie odpowiednich modyfikacji np. wyginania, obracania. Zastosowanie Light Meter w znacznym stopniu zwiększa dokładność względem poprzedniej omówionej metody. Uzyskując rozkład natężenia oświetlenia na oświetlanym obiekcie oraz znając jego wymiary, można obliczyć wartość strumienia użytecznego zgodnie z zależnością (3.19). Przy jej stosowaniu mogą wystąpić duże trudności ze względu na skomplikowany stopień

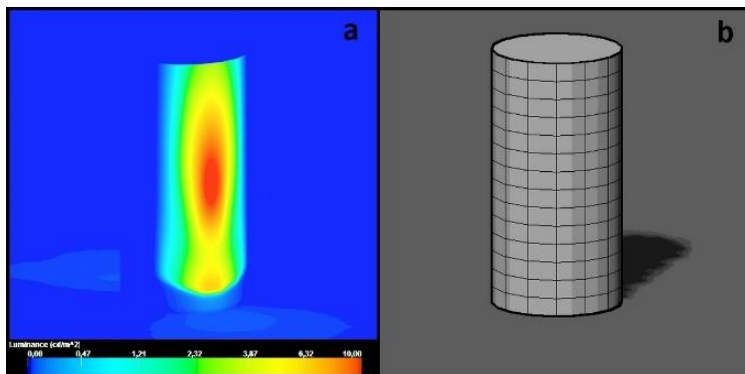
geometrii oświetlanego obiektu. Zleca się zatem, aby była stosowana dla obiektów o niezbyt skomplikowanej geometrii.

$$\phi_u = ES = Eab \text{ [lm]} \quad (3.19.)$$

gdzie:

E – średnia wartość natężenia oświetlenia na tej powierzchni,

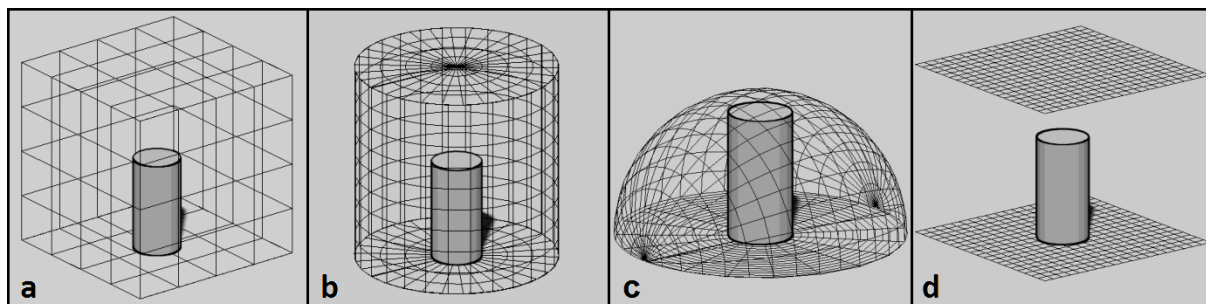
a i b – główne wymiary powierzchni LightMeter przed modyfikacją.



Rys. 3.11. Metoda obliczeń strumienia użytecznego: a – wzrokowa ocena luminancji średniej (rozkład luminancji oświetlanego obiektu), b – siatka obliczeniowa nałożona na obiekt w metodzie płaszczyzny obiektu (elewacyjnej) [120]

3.4.3. Obliczenia strumienia nieużytecznego

Bardzo często może wystąpić przypadek, w którym geometria oświetlanego obiektu jest na tyle skomplikowana, że zastosowanie metod obliczeń strumienia użytecznego nie jest zalecane ze względu na możliwość popełnienia dużych błędów w obliczeniach lub po prostu nie jest możliwe. W takim przypadku można skorzystać z autorskich metod obliczeń, które w pierwszej kolejności umożliwiają obliczenie strumienia nieużytecznego, a następnie znając pozostałe parametry instalacji iluminacyjnej przejść na wartość strumienia użytecznego i obliczyć pozostałe parametry dedykowane do obiektywnej oceny projektu iluminacji. Zaprojektowano cztery metody (rys. 3.12) i opisano je dokładnie poniżej. Wszystkie polegają na zamknięciu obiektu iluminacji we wnętrzu określonej bryły i na analizie strumienia świetlnego docierającego do powierzchni ograniczającej bryłę.



Rys. 3.12. Metody obliczeń strumienia nieużytecznego przedstawiony w schematyczny sposób: a – metoda prostopadłościanu, b – metoda walca, c – metoda półsfery, d – metoda płaszczyzny nad obiektem [120]

Metoda prostopadłościanu polega na „obudowaniu” oświetlonego obiektu powierzchniami obliczeniowymi tworzącymi prostopadłościan (rys. 3.12a). Sumując strumień świetlny docierający do każdej z sześciu ścian prostopadłościanu (lub sześcianu) uzyskuje się strumień nieużyteczny (3.20 – 3.21). Oświetlenie od wewnątrz ścian tej bryły będzie następstwem niedopasowania brył fotometrycznych zastosowanych opraw (oraz ich wycelowania i lokalizacji) do geometrii iluminowanego obiektu.

Metoda walca i półsfery – polega na obudowaniu oświetlanego obiektu powierzchniami obliczeniowymi ukształtowanymi w walec lub półsferę (rys. 3.12 b,c). Wtedy jego wartość można obliczyć korzystając z prostych geometrycznych zależności określających pole powierzchni walca oraz półsfery oraz podstawą w kształcie koła (3.22 – 3.23).

Dla prostopadłościanu:

$$\phi_{nu} = \sum_{i=1}^6 (E_i S) = \sum_{i=1}^2 (E_i ab) + \sum_{i=1}^2 (E_i ah) + \sum_{i=1}^2 (E_i bh) [lm] \quad (3.20.)$$

Dla sześcianu:

$$\phi_{nu} = \sum_{i=1}^6 (E_i S) = \sum_{i=1}^6 (E_i ab) [lm] \quad (3.21.)$$

Dla walca:

$$\phi_{nu} = \pi R [R(E_{p1} + E_{p2}) + 2HE_b] [lm] \quad (3.22.)$$

Dla półsfery:

$$\phi_{nu} = \pi R^2 (E_p + 2E_s) [lm] \quad (3.23.)$$

gdzie:

a, b, h – główne wymiary powierzchni obliczeniowej,

E, E_{p1}, E_{p2} – średnie natężenia oświetlenia na podstawach walca i sfery,

E_s, E_b – średnie natężenie oświetlenia na powierzchni półsfery i powierzchni bocznej walca,

R – promień walca lub półsfery,

H – wysokość walca.

Metoda płaszczyzn równoległych – jest to ostatnia z metod obliczeń strumienia nieużytecznego. Usytuowanie powierzchni obliczeniowych względem oświetlanego obiektu zostało przedstawione na rysunku 3.12 d. Obliczenia średniej wielkości natężenia oświetlenia wykonuje się tylko dla dwóch powierzchni obliczeniowych zlokalizowanych nad i pod oświetlanym obiektem. Idea tej metody jest taka, żeby powierzchnie obliczeniowe były nieskończenie duże, co w praktyce jest niemożliwe do uzyskania. Używa się zatem powierzchni dużych na tyle, aby uzyskane wyniki charakteryzowały się zadowalającą dokładnością. Wzór na strumień nieużyteczny w tej metodzie przedstawia (3.24).

$$\phi_{nu} = (E_{nad} + E_{pod})S = (E_{nad} + E_{pod})ab [lm] \quad (3.24.)$$

gdzie:

a, b – główne wymiary powierzchni obliczeniowych,

E_{nad} – średnie natężenie oświetlenia na powierzchni zlokalizowanej nad obiektem

E_{pod} – średnie natężenie oświetlenia na powierzchni zlokalizowanej pod obiektem

Jak pokazano w literaturze, opisane powyżej metody obliczeń strumienia użytecznego i nieużytecznego są zbieżne [120]. Jednak ze względu na swoją praktyczność i prostą implementację jako tę najbardziej odpowiednią uznaje się Metodę Prostopadłościanu (Sześcianu). Daje one najwięcej informacji np. którą stroną obiektu wycieka najwięcej strumienia

3.4.4. Analiza dokładności i wiarygodności obliczeń wykonywanych przy pomocy programu 3dS Max

Oprogramowanie Autodesk 3dS MAX nie jest oprogramowaniem, w którym zazwyczaj wykonuje się analityczne obliczenia oświetlenia. Służy raczej do tworzenia efektownych i wiarygodnych wizualizacji komputerowych. Z tego względu postanowiono sprawdzić działanie algorytmu obliczeniowego tego oprogramowania względem oprogramowania dedykowanego do obliczeń oświetlenia: DIALux 4.12. Postanowiono przeprowadzić następujące doświadczenia obliczeniowe:

- doświadczenie nr 1: „Badanie poprawności obliczeń składowej bezpośredniej oświetlenia”.

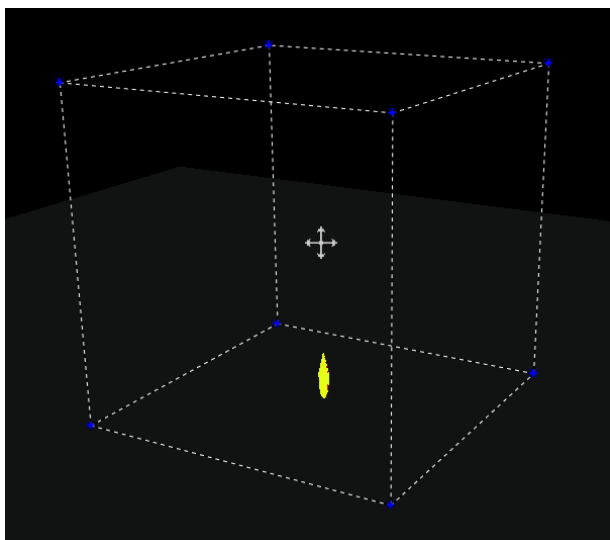
Jedna oprawa oświetleniowa o parametrach z tablicy 3.7, usytuowana w środku powierzchni obliczeniowych tworzących sześciąt o boku 10m (rys. 3.12 i 3.13). Wyniki obliczeń oświetlenia dla doświadczenia 1 zostały przedstawione w tablicy 3.8.

- doświadczenie nr 2: „Badanie wpływu dyskretyzacji siatki obliczeniowej na wyniki obliczeń składowej bezpośredniej oświetlenia”.

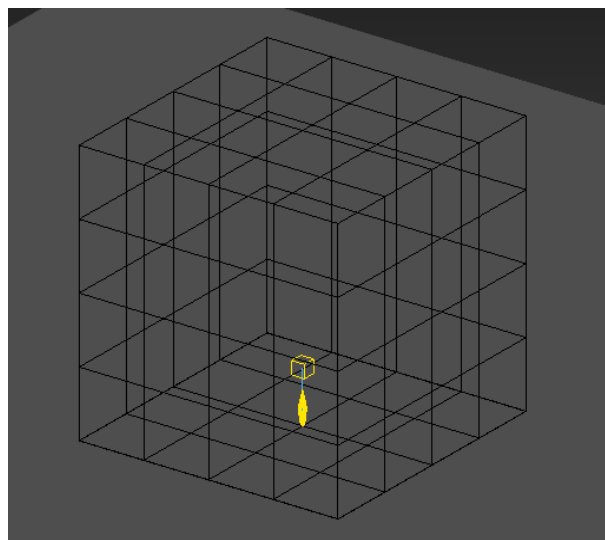
Dwie oprawy oświetleniowe o parametrach z tablicy 3.7, usytuowane pod kątem do oświetlanej powierzchni obliczeniowej, w pewnej od niej odległości (rys. 3.14, 3.15). Wyniki obliczeń oświetlenia dla doświadczenia 2 zostały przedstawione w tablicach 3.9 i 3.10.

Tablica 3.7. Dane oprawy oświetleniowej zastosowanej w badaniu dokładności programu 3dS MAX

Typ	Źródło światła	Rozsył	P_0	ϕ_0	η_{op}	Φ_{op}	I_{max}	$\delta_{1/2}$
			[W]	[lm]	[%]	[lm]	[cd]	[°]
oprawa doziemna	MH	obrotowo –symetryczny	70W	6900	61	4181	12114	25



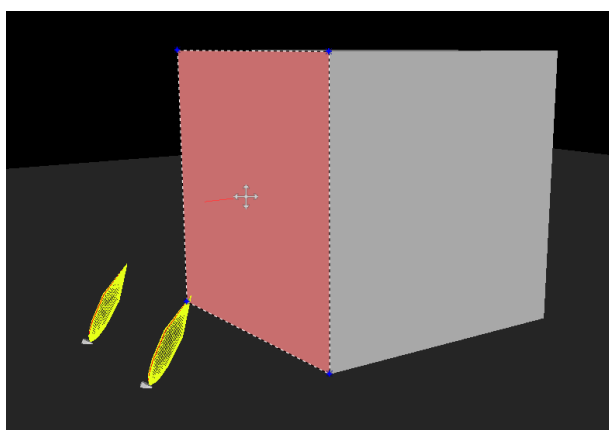
Rys. 3.12. Widok układu do doświadczenia 1 w programie DIALux 4.12



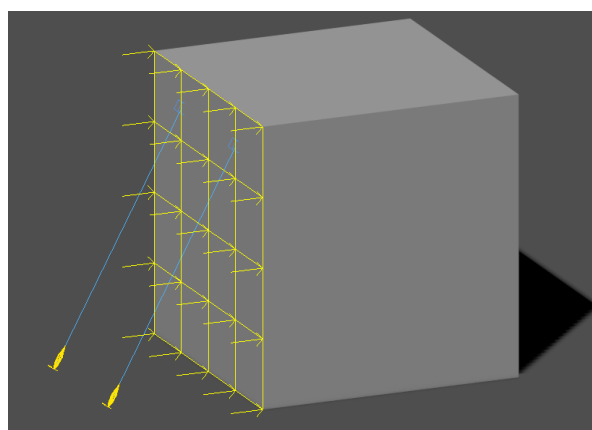
Rys. 3.13. Widok układu do doświadczenia 1 w programie 3ds MAX 2016

Tablica 3.8. Zestawienie wyników obliczeń i błędów względnych dla doświadczenia 1

Powierzchnia	E_{DIAL} [lx]	E_{MAX} [lx]	S [m ²]	Φ_{DIAL} [lm]	Φ_{3DS} [lm]
dół	0	0	100	0	0
górną	30	30,03		3000	3003
bok 1	2,84	2,82		284	282
bok 2	2,84	2,82		284	282
bok 3	2,84	2,82		284	282
bok 4	2,84	2,82		284	282
Σ [lm]				4136	4131
$\Delta\phi$ [lm]				45,4	50,4
$\delta\phi$ [%]				1,09	1,21



Rys. 3.14. Widok układu do doświadczenia 2 w programie DIALux 4.12



Rys. 3.15. Widok układu do doświadczenia 2 w programie 3ds MAX 2016

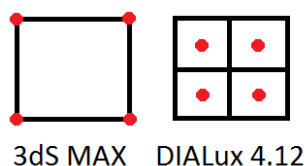
Tablica 3.9. Zestawienie wyników obliczeń oświetlenia dla programu DIALux 4.12 dla doświadczenia 2

Liczba punktów	Oczko siatki	E_{DIAL} [lx]	S [m ²]	Φ_u [lm]	Φ_{nu} [lm]	η_{il} [%]
5x5	1,0	171	25	4275	4087,8	31
6x6	0,9	172		4300	4062,8	31
7x7	0,7	169		4225	4137,8	31
8x8	0,6	173		4325	4037,8	31
10x10	0,5	170		4250	4112,8	31
12x12	0,4	170		4250	4112,8	31
17x17	0,3	168		4200	4162,8	30
25x25	0,2	168		4200	4162,8	30
50x50	0,1	169		4225	4137,8	31

Tablica 3.10. Zestawienie wyników obliczeń oświetlenia dla programu 3dS MAX 2016 dla doświadczenia 2

Liczba punktów	Oczko siatki	E_{3DS} [lx]	S [m ²]	Φ_u [lm]	Φ_{nu} [lm]	η_{il} [%]
5x5	1,0	132,1	25	3303	5060	24
6x6	0,9	136,93		3423	4940	25
7x7	0,7	141,34		3534	4829	26
8x8	0,6	144,87		3622	4741	26
10x10	0,5	149,62		3741	4622	27
12x12	0,4	152,85		3821	4542	28
17x17	0,3	157,37		3934	4429	29
25x25	0,2	160,9		4023	4340	29
50x50	0,1	164,57		4114	4249	30

Jak widać na podstawie wyników z tablic 3.8 wyniki obliczeń strumienia świetlnego z danego pliku IES są praktycznie takie same. Obydwa programy wykonują obliczenia z podobną dokładnością. Błędy względne w obydwu przypadkach wynoszą około 1% – jako odniesienie posłużył strumień świetlny oprawy wyliczony bezpośrednio z pliku .ies (na podstawie analizy strumienia świetlnego źródła światła oraz sprawności oprawy). Uzyskana wartość błędu względnego może wynikać z błędów zaokrągleń algorytmów obliczeniowych obydwu programów. Taka dokładność obliczeniowa jest wystarczająca. Różnice pojawiają się natomiast w doświadczeniu nr 2. Na podstawie danych zawartych w tablicach 3.9 i 3.10 widać, że uzyskane wartości sprawności iluminacji zaczynają być zbliżone dopiero dla dużej dyskretyzacji oczka siatki obliczeniowej. Tłumaczyć to można różnym rozmieszczeniem punktów obliczeniowych w oczku siatki obliczeniowej w poszczególnych programach (rys. 3.16).

**Rys. 3.16.** Schematyczne rozmieszczenie punktów obliczeniowych w oczku siatki obliczeniowej poszczególnych programów

Dzięki przeprowadzonym doświadczeniom można ustalić warunek obliczeń sprawności iluminacji przy wykorzystaniu metod obliczeń strumienia użytecznego i nieużytecznego:

Przeprowadzając obliczenia sprawności iluminacji na podstawie metod obliczeń strumienia użytecznego lub nieużytecznego należy zadbać o dużą dokładność obliczeniową dzięki zastosowaniu dostatecznie dużych powierzchni obliczeniowych z odpowiednią dyskretyzacją punktów obliczeniowych.

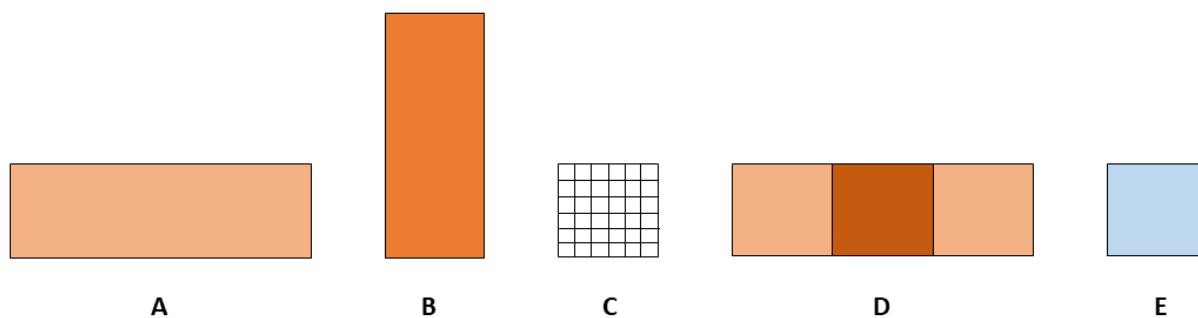
Należy pamiętać również o tym, aby wszystkie zastosowane w danej scenie świetlnej oprawy oświetleniowe znajdowały się we wnętrzu prostopadłościanu (sześciangu) złożonego z płaszczyzn obliczeniowych.

4. APLIKACJA NOWYCH PARAMETRÓW DLA POTRZEB OCENY EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ I ZANIECZYSZCZENIA ŚWIATŁEM ZŁOŻONYCH PROJEKTÓW ILUMINACJI

4.1. Podział architektury – obiekty wytypowane do obliczeń

Jak pokazano w podrozdziale 1.1, iluminacja obiektów może dotyczyć praktycznie wszystkich obiektów architektonicznych. Obiekty te, mogą różnić się między sobą typem architektury. Projektując iluminację obiektów należy mieć na uwadze, aby w odpowiedni sposób za pomocą koncepcji iluminacji, wyróżnić charakterystyczne cechy danego stylu architektonicznego. Wyróżnienie może polegać na zaznaczeniu kształtów poszczególnych elementów, swoistego rytmu elewacji, bogactwa zdobień itp. Wynika z tego, że w zależności od rodzaju architektury należy przyjąć odpowiedni sposób iluminacji poszczególnych powierzchni poprzez właściwe rozmieszczenie i wycelowanie sprzętu oświetleniowego różnego typu (a także jego dobór co do jakości i bryły fotometrycznej). Przeprowadzone wstępne obliczenia symulacyjne oraz wykonane pomiary podpowiadają, że dobrze by było poddać analizie obiekty architektoniczne, które w znacznym stopniu różnią się między sobą stylem architektonicznym (geometrią). Dla potrzeb tych badań ustalono, że wybrane obiekty powinny stanowić typową reprezentację iluminowanych obiektów, co spowodowało ograniczenie do architektury najczęściej występującej na terenie Polski. W wyniku tego założenia postanowiono wydzielić następujące grupy obiektów iluminowanych:

- obiekty bardzo rozłożyste, ale stosunkowo niskie (np. barokowe pałace i pałacyki),
- obiekty bardzo wysokie, ale stosunkowo mało rozłożyste (np. kościoły gotyckie i neogotyckie),
- obiekty znajdujące się w bliskiej odległości innych obiektów (np. kamieniczki w pierzei),
- obiekty przezierne – obiekty inżynierskie (np. mosty wantowe, wieże przekaźnikowe),
- obiekty nowoczesne (np. ratusze miejskie, galerie handlowe).



Rys. 4.1. Schematyczne porównanie gabarytów obiektów iluminowanych, wytypowanych do badań: A – obiekt rozłożysty, B – obiekt strzelisty, C – obiekt przezierny, D – obiekt znajdujący się w bliskiej innych obiektów, E – obiekt nowoczesny (duży udział szklanych powierzchni)

Dla każdej z grup obiektów architektonicznych został wybrany typowy przedstawiciel:

- obiekt rozłożysty – Pałac Zamoyskich w Kozłówce,
- obiekt strzelisty – kościół pw. św. Jana Chrzciciela w Tczowie,
- obiekt przezierny – most wantowy stylizowany na Most Świętokrzyski w Warszawie
- obiekt znajdujący się w bliskiej odległości innych obiektów – kamienica na Starym Mieście w Warszawie (ul. Krakowskie Przedmieście 65),
- obiekt nowoczesny – Ratusz Ursynów m. st. Warszawy.

4.2. Metodologia obliczeń oraz sprzęt oświetleniowy

Dla wszystkich przedstawicieli poszczególnej grupy obiektów architektonicznych zostały wykonane modele geometryczne w programie Autodesk 3ds MAX, zdefiniowane materiały oraz stworzone profesjonalne projekty iluminacji (wraz z wizualizacją komputerową). Dla czterech z pięciu modeli zostały stworzone po dwie koncepcje iluminacji. Jedna z nich przedstawia metodę zalewową, a druga punktową. Wyjątkiem jest obiekt inżynierski (most wantowy), dla którego została wykonana tylko jedna koncepcja. W trakcie projektowania iluminacji nie były zakładane ograniczenia projektowe związane rzeczywistymi warunkami terenowymi.

Najważniejszym zadaniem było spełnienie zasad iluminacji związanych z poszczególnymi metodami iluminacji oraz uzyskanie satysfakcjonującego efektu estetycznego. Rozmieszczenie sprzętu oświetleniowego poszczególnych dla koncepcji iluminacji odpowiednich obiektów znajduje się w załącznikach do (A–E). Natomiast wizualizacje poszczególnych wariantów iluminacji oraz krótki opis koncepcji iluminacji

zostały umieszczone w podrozdziałach 4.2.1. – 4.2.5. Ponadto, dla wszystkich obiektów i koncepcji zostały przeprowadzone obliczenia nowych parametrów oceny efektywności energetycznej i zanieczyszczenia światłem projektu iluminacji zgodnie z następującymi założeniami:

- ✓ wykorzystanie Metody Prostopadłościanu (Sześcianu),
- ✓ spełnienie warunku odpowiedniej wielkości oraz dyskretyzacji powierzchni obliczeniowych,
- ✓ obliczenia wykonano dla przypadku, gdy wszystkie oprawy oświetleniowe razem z obiektem znajdują się wewnątrz prostopadłościanu (sześćcianu) zbudowanego z płaszczyzn obliczeniowych,
- ✓ obliczenia wykonano jedynie dla składowej bezpośredniej oświetlenia (bez uwzględnienia zjawiska odbić wielokrotnych),
- ✓ zastosowanie sprzęt oświetleniowego producentów z górnej półki cenowej, cieszących się na rynku opinią najwyższej jakości wykonania. Przy doborze zwracano uwagę na to czy producent podaje wszystkie podstawowe, niezbędne do dalszych obliczeń dane (strumień źródła światła, strumień oprawy oświetleniowej, sprawność oprawy oświetleniowej, bryłę fotometryczną). Poszczególne nazwy zastosowanych opraw np. A1, B4 itp. również stosowne odniesienie do karty katalogowej oprawy (udostępnionej przez producenta sprzętu) zawarte w literaturze niniejszej pracy.
- ✓ Całkowita moc zainstalowana danej koncepcji iluminacji została podana w poszczególnych tablicach i oznaczona jako P_c .

4.2.1. Obiekt rozłożysty

Krótki opis koncepcji zalewowej (rys. 4.2 i 4.3):

Metoda zalewowa charakteryzuje się dużą równomiernością oświetlenia. W celu uzyskania ciekawszego efektu zrealizowano w tym przypadku asymetryczne cieniowanie wybranych wypukłych detali. Oświetlenia następuje pod dużym kątem od lewej strony obiektu. Z jego prawej strony również znajduje się jeden naświetlacz, tak aby zachować spójność obrazu.

Krótki opis koncepcji punktowej (rys. 4.4 i 4.5):

Metoda punktowa ma na celu doświetlenie detali architektonicznych. Zastosowano linie świetlne, tak aby pilastry, tympanon, balkony na poziomie dachu oraz detale na wieżach zostały w odpowiedni sposób podkreślone. Rozświetlono również wnęki podcieni oraz wewnątrz balkon zlokalizowanego nad podcieniami.

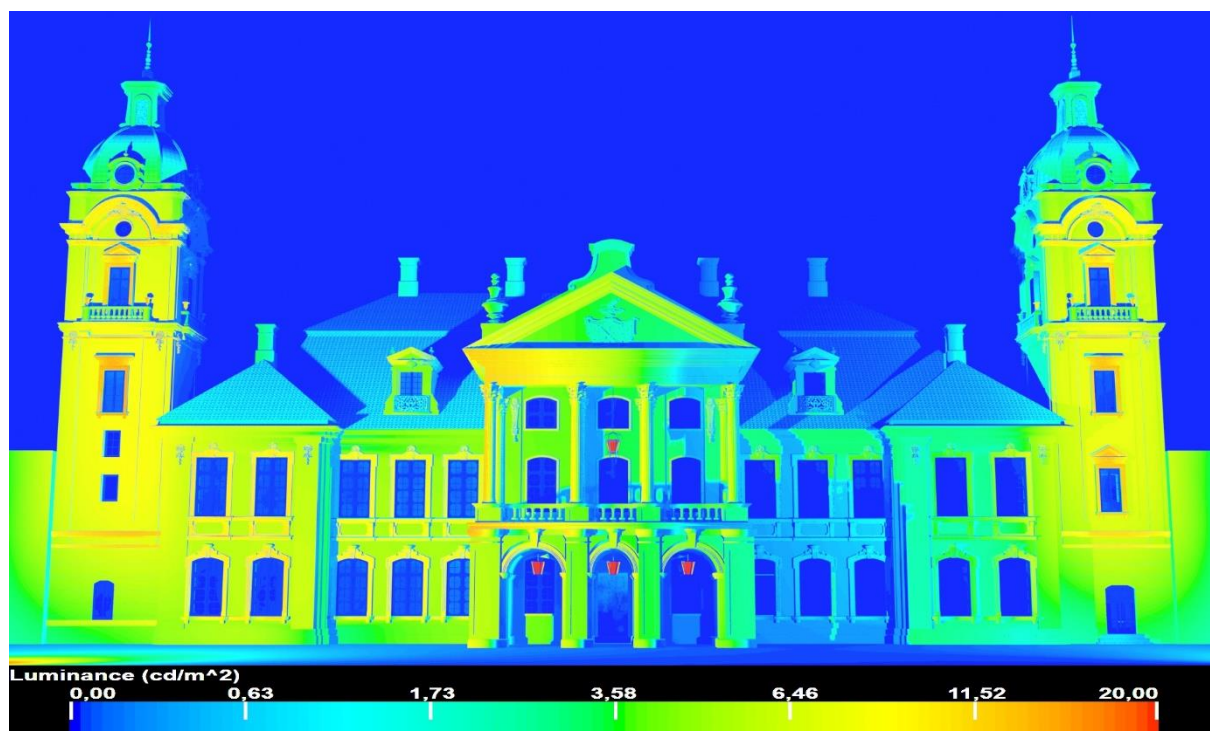
Tablica 4.1. Zestawienie podstawowych danych sprzętu oświetleniowego zastosowanego do poszczególnych koncepcji iluminacji Pałacu Zamoyskich w Kozłówcze

L.p.	Typ	Rozsył	Liczba	Typ źródła	T_c [K]	P_0 [W]	P_{op} [W]	Φ_0 [lm]	Φ_{op} [lm]	η_{op} [%]
Koncepcja zalewowa										
1.	A1	osiowosymetryczny szeroki	3	MH	4000	400	440	36000	26280	73
2.	B1	rozciągnięcie wiązki w pionie	2	MH	4000	400	440	36000	25920	72
		SUMA:	5			P_c [kW]	2,2			
Koncepcja punktowa										
1.	A2	osiowo-symetryczny	42	LED	4000	–*	15	775	867	89
2.	B2	obrotowo-symetryczny	14	LED	4000	37,5	42	5060	3849	76
3.	C2	obrotowo-symetryczny wąski	4	MH	4000	250	272	25500	19635	77
4.	D2	asymetryczny	2	MH	4000	250	261	20000	13800	69
5.	E2	asymetryczny	3	MH	4000	150	168	11250	6525	58
6.	F2	asymetryczny	3	MH	4000	70	88	5000	2650	53
7.	G2	rozciągnięcie wiązki w pionie	2	MH	4000	400	440	36000	25920	72
8.	H2	obrotowo-symetryczny wąski	4	MH	4000	70	83	6600	4488	68
9.	I2	asymetryczny	4	LED	4000	17,9	21	2044	2825	72
10.	J2	osiowosymetryczny	1	LED	4000	40	46	2787	5000	56
		SUMA:	85			P_c [kW]	4,94			

*brak danych



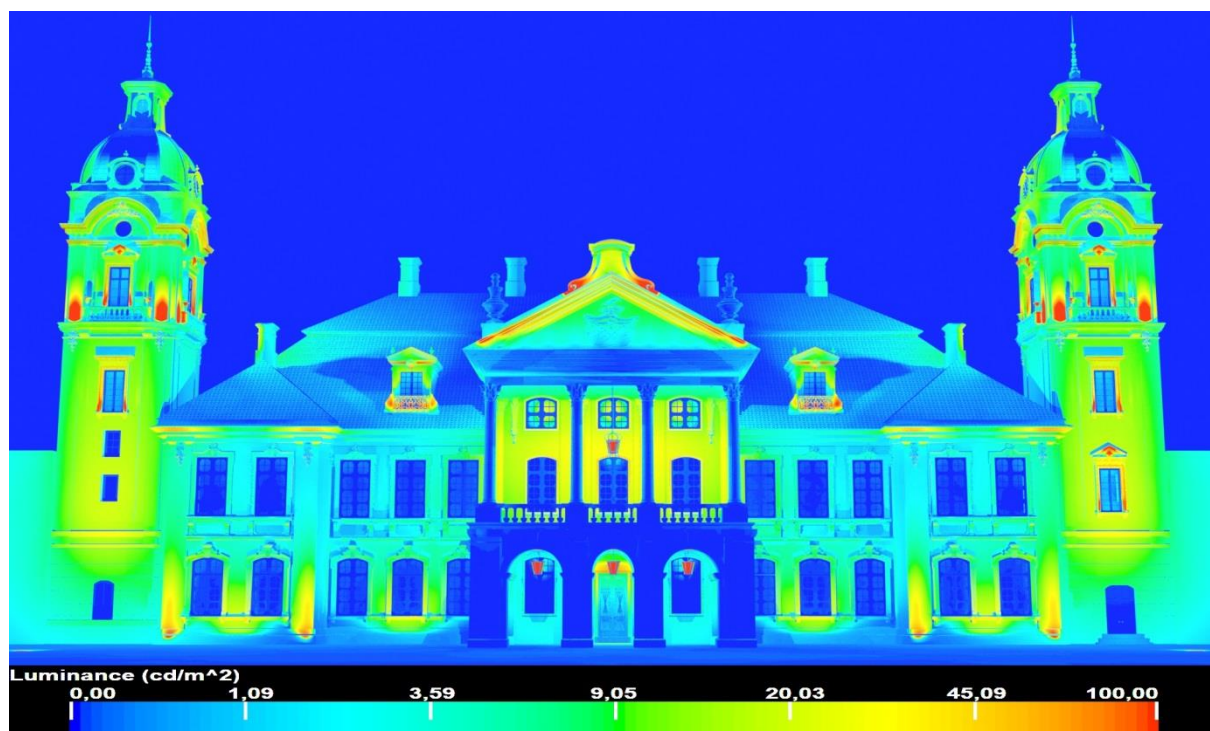
Rys. 4.2. Wizualizacja komputerowa koncepcji zalewowej iluminacji Palacu Zamoyskich w Kozłowiec



Rys. 4.3. Rozkład luminancji koncepcji zalewowej iluminacji Palacu Zamoyskich w Kozłowiec



Rys. 4.4. Wizualizacja komputerowa koncepcji punktowej iluminacji Pałacu Zamoyskich w Kozłówece



Rys. 4.5. Rozkład luminancji koncepcji punktowej iluminacji Pałacu Zamoyskich w Kozłówece

4.2.2. Obiekt strzelisty

Krótki opis koncepcji zalewowej (rys. 4.6 – 4.9):

Koncepcja zalewowa iluminacji kościoła neogotyckiego opiera się na równomiernym zalaniu światłem jego głównych powierzchni, z realizacją zasady eksponowania wysokości obiektu (im wyżej tym jaśniej) [3]. Dzięki temu uzyskuje się efekt podkreślenia obrazu Matki Boskiej oraz rozety zlokalizowanych nad drzwiami wejściowymi. Dodatkowo wszystkie drzwi wejściowe są podkreślone większą luminancją, co jest związane z odpowiednią symboliką chrześcijańską [120]. Na przyporach kościoła realizuje się efekt asymetrycznego cieniowania.

Krótki opis koncepcji punktowej (rys. 4.10 – 4.13):

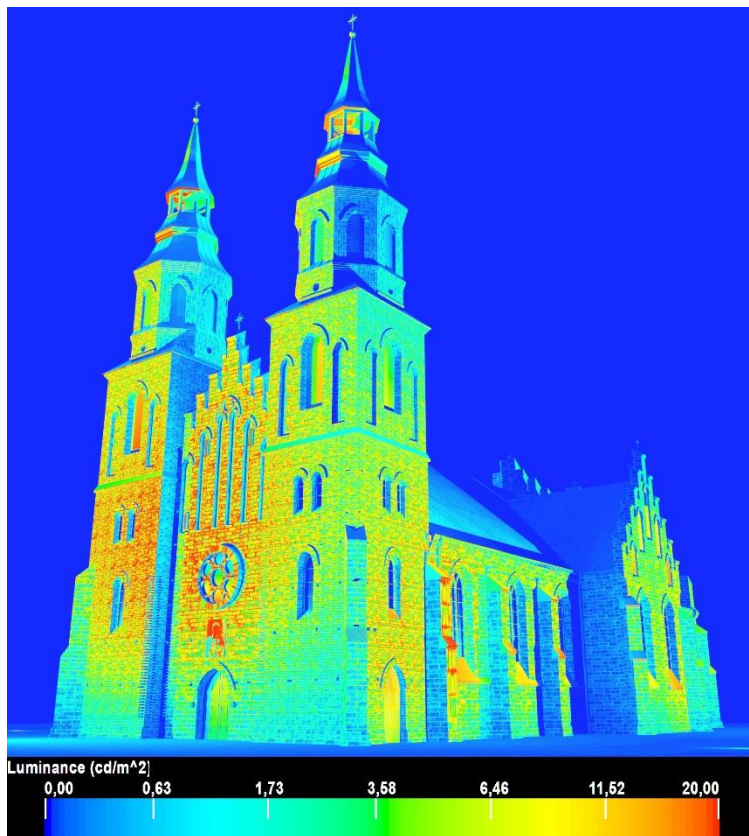
Koncepcja punktowa realizuje w całości koncepcję zalewową z tym, że pozostałe detale architektoniczne zostały wyraźnie podkreślone przez dodatkowe oprawy oświetleniowe. Zwiększono również luminancję na najwyższych poziomach wież [122].

Tablica 4.2. Zestawienie podstawowych danych sprzętu oświetleniowego zastosowanego do poszczególnych koncepcji iluminacji kościoła pw. św. Jana Chrzciciela w Tczowie

L.p.	Typ	Rozsył	Liczba	Typ źródła	T_c [K]	P_0 [W]	P_{op} [W]	Φ_0 [lm]	Φ_{op} [lm]	η_{op} [%]
Koncepcja zalewowa										
1.	A3	obrotowo–symetryczny średni	12	LED	3000	303	326	52800	40507	77
2.	B3	obrotowo–symetryczny wąski	4	LED	3000	303	326	52800	39644	75
3.	C3	obrotowo–symetryczny wąski	6	LED	3000	29	33,5	3375	1454	43
4.	D3	osiowosymetryczny	5	LED	4000	40	46	5000	2787	56
		SUMA:	27			P_c [kW]	5,65			
Koncepcja punktowa										
1.	A4	obrotowo–symetryczny średni	2	LED	3000	303	326	52800	40507	77
2.	B4	obrotowo–symetryczny wąski	8	LED	3000	303	323	46020	17580	38
3.	C4	obrotowo–symetryczny wąski	6	LED	3000	29	33,5	3375	1454	43
4.	D4	osiowosymetryczny	65	LED	3000	40	46	5000	2787	56
5.	E4	asymetryczny	18	LED	3000	39,6	45	3670	2439	62
6.	F4	obrotowo–symetryczny wąski	36	LED	3000	37,5	42	4910	3735	76
7.	G4	obrotowo–symetryczny wąski	18	LED	3000	71,1	77	10550	8044	76
		SUMA:	153			P_c [kW]	10,13			



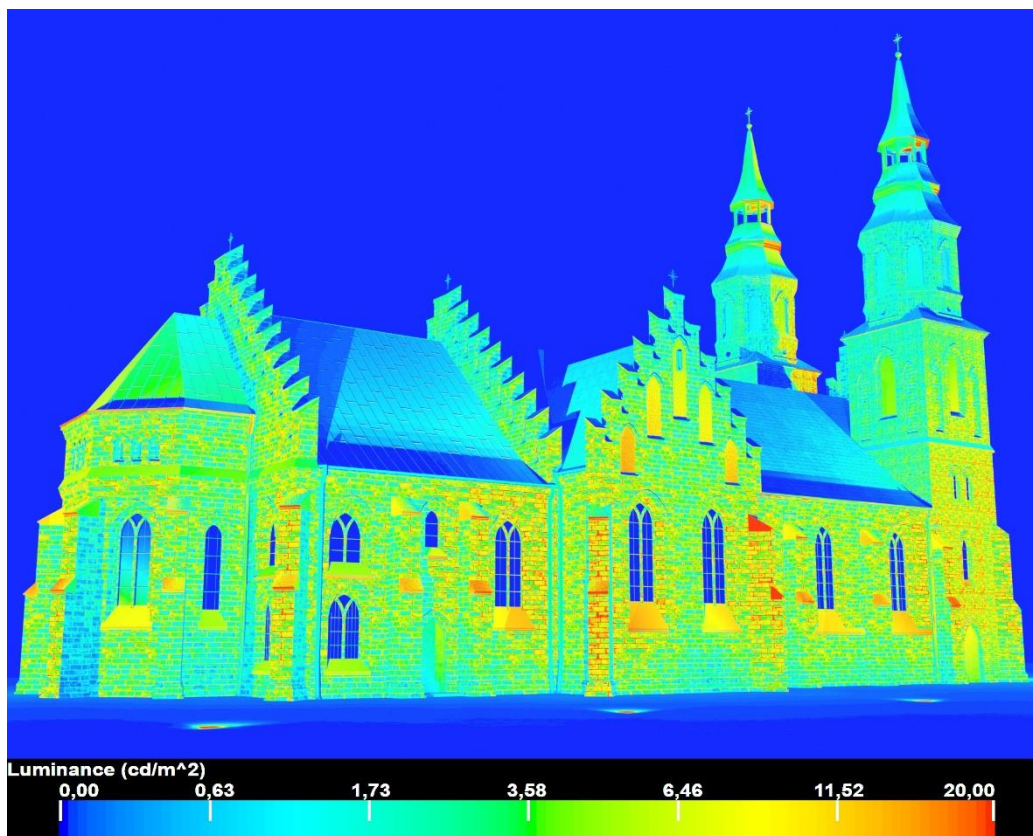
Rys. 4.6. Wizualizacja komputerowa koncepcji zalewowej iluminacji kościoła pw. św. Jana Chrzciciela w Tczowie – widok 1



Rys. 4.7. Rozkład luminancji koncepcji zalewowej iluminacji kościoła pw. św. Jana Chrzciciela w Tczowie – widok 1



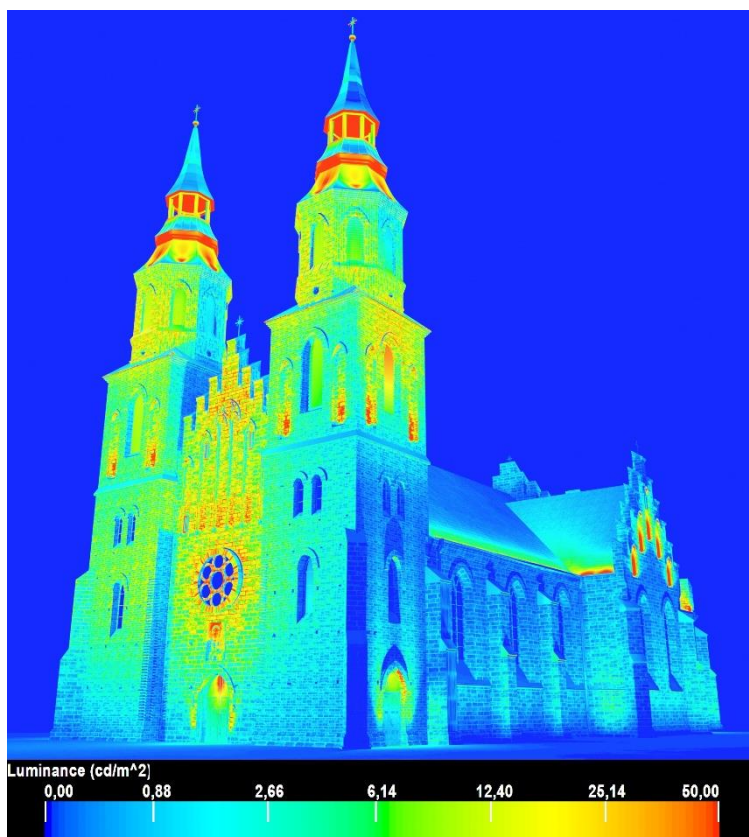
Rys. 4.8. Wizualizacja komputerowa koncepcji zalewowej iluminacji kościoła pw. św. Jana Chrzciciela w Tczowie – widok 2



Rys. 4.9. Rozkład luminancji koncepcji zalewowej iluminacji kościoła pw. św. Jana Chrzciciela w Tczowie – widok 2



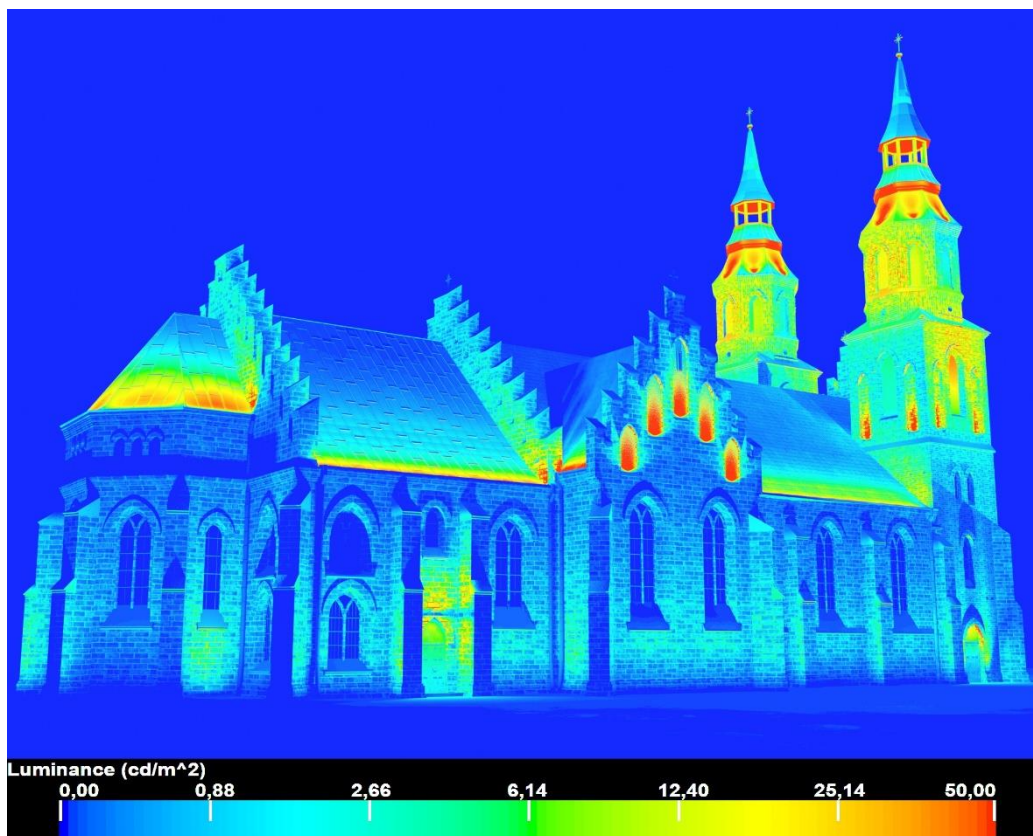
Rys. 4.10. Wizualizacja komputerowa koncepcji punktowej iluminacji kościoła pw. św. Jana Chrzciciela w Tczowie – widok 1



Rys. 4.11. Rozkład luminancji koncepcji punktowej iluminacji kościoła pw. św. Jana Chrzciciela w Tczowie – widok 1



Rys. 4.12. Wizualizacja komputerowa koncepcji punktowej iluminacji kościoła pw. św. Jana Chrzciciela w Tczowie – widok 2



Rys. 4.13. Rozkład luminancji koncepcji punktowej iluminacji kościoła pw. św. Jana Chrzciciela w Tczowie – widok 2

4.2.3. Obiekt inżynierski

Krótki opis koncepcji iluminacji (rys. 4.14 i 4.15):

Koncepcja iluminacji mostu wantungo opiera się głównie na dotychczasowych dobrych praktykach projektowych dla tego typu obiektów [3]. Postanowiono zatem:

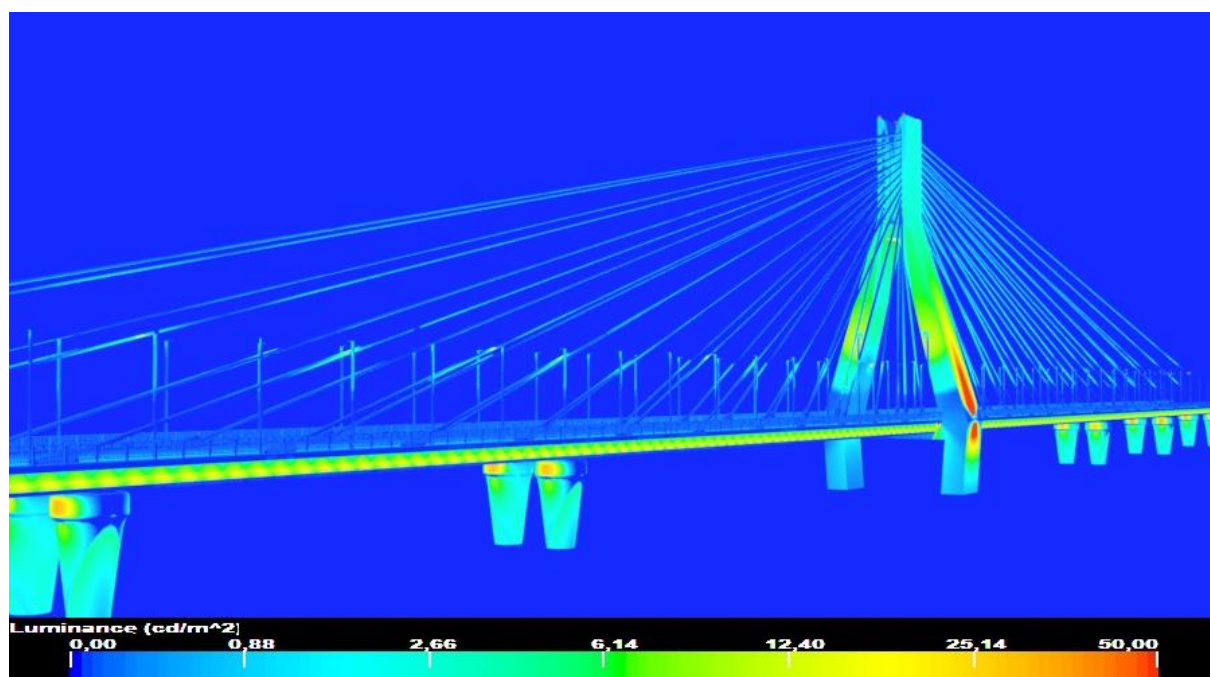
- doświetlić most na całej jego długości poprzez zastosowanie linii świetlnych, tak aby zapewnić odpowiednie podkreślenie górowania mostu nad wodą oraz pokazanie poziomej linii połączenia brzegów,
- doświetlić most na jego szerokości, tak aby nadać obrazowi odpowiedni efekt plastyczny (brak spłaszczenia w wyniku niedoświetlenia trzeciego wymiaru),
- oświetlić pylon, jako element najbardziej wyróżniający się z całej architektury mostu,
- doświetlić wanty, żeby zachować spójność powstałego obrazu i zmniejszyć gradienty luminancji.

Tablica 4.3. Zestawienie podstawowych danych sprzętu oświetleniowego zastosowanego do poszczególnych koncepcji iluminacji mostu wantungo stylizowanego na Most Świętokrzyski w Warszawie

L.p.	Typ	Rozsył	Liczba	Typ źródła	T_c [K]	P_0 [W]	P_{op} [W]	Φ_0 [lm]	Φ_{op} [lm]	η_{op} [%]
1.	A5	osiowo –symetryczny	450	LED	4000	20	23	2500	1339	54
2.	B5	osiowo –symetryczny	46	MH	4000	150	163	13500	9855	73
3.	C5	obrotowo –symetryczny	12	LED	4000	47,5	53	6405	4400	69
4.	D5	osiowo –symetryczny	2	MH	4000	400	440	36000	28080	78
		SUMA:	510			P_c [kW]	19,36			



Rys. 4.14. Wizualizacja komputerowa iluminacji mostu wianowego stylizowanego na Most Świętokrzyski w Warszawie



Rys. 4.15. Rozkład luminancji iluminacji mostu wianowego stylizowanego na Most Świętokrzyski w Warszawie

4.2.4. Obiekt zlokalizowany w pierzei

Krótki opis koncepcji zalewowej (rys. 4.16 i 4.17):

Obiekt charakteryzuje się swoistą warstwowością. Jest tak ze względu na gzymsy, które w wyrazisty sposób podkreślają oddzielenie poszczególnych kondygnacji kamieniczki. W metodzie zalewowej, postanowiono podkreślić tę cechę. Świecenie następuje z dystansu za pomocą opraw o bryle fotometrycznej z rozciągnięciem wiązki w płaszczyźnie poziomej.

Krótki opis koncepcji punktowej (rys. 4.18 i 4.19):

W koncepcji punktowej postanowiono wyróżnić poszczególne warstwy obiektu poprzez zastosowanie linii świetlnych. Ponadto, dzięki temu rozwiązaniu spodziewany jest również efekt dużego uporządkowania obrazu iluminacji nie tylko w kierunku poziomym, lecz także pionowym. Postanowiono również wyróżnić detale elewacji (małe tympanony zlokalizowane na poziomie pierwszego piętra) oraz realizować zasadę wzmacniania wysokości. Oprawy w tym rozwiązaniu montowane są bezpośrednio na elewacji.

Tablica 4.4. Zestawienie podstawowych danych sprzętu oświetleniowego zastosowanego do poszczególnych koncepcji iluminacji kamieniczki na ul. Krakowskie Przedmieście 65 w Warszawie

L.p.	Typ	Rozsył	Liczba	Typ źródła	T_c [K]	P_0 [W]	P_{op} [W]	Φ_0 [lm]	Φ_{op} [lm]	η_{op} [%]
Koncepcja zalewowa iluminacja kamieniczki										
1.	A6	osiowo –symteryiczny	2	MH	4000	70	88	6600	4224	64
2.	B6	obrotowo –symteryiczny	2	MH	4000	20	23	1600	1027	67
3.	C6	osiowo– symteryiczny	1	MH	4000	150	167	14000	8960	64
		SUMA:	5			P_c [kW]	0,39			
Koncepcja punktowa iluminacja kamieniczki										
1.	A7	obrotowo– symteryiczny	6	MH	4000	20	23	1600	896	56
2.	B7	osiowo– symteryiczny	9	LED	4000	–*	16,3	192	113	59
3.	C7	osiowo– symteryiczny	25	LED	4000	–*	16,5	540	319	59
		SUMA:	40			P_c [kW]	0,70			

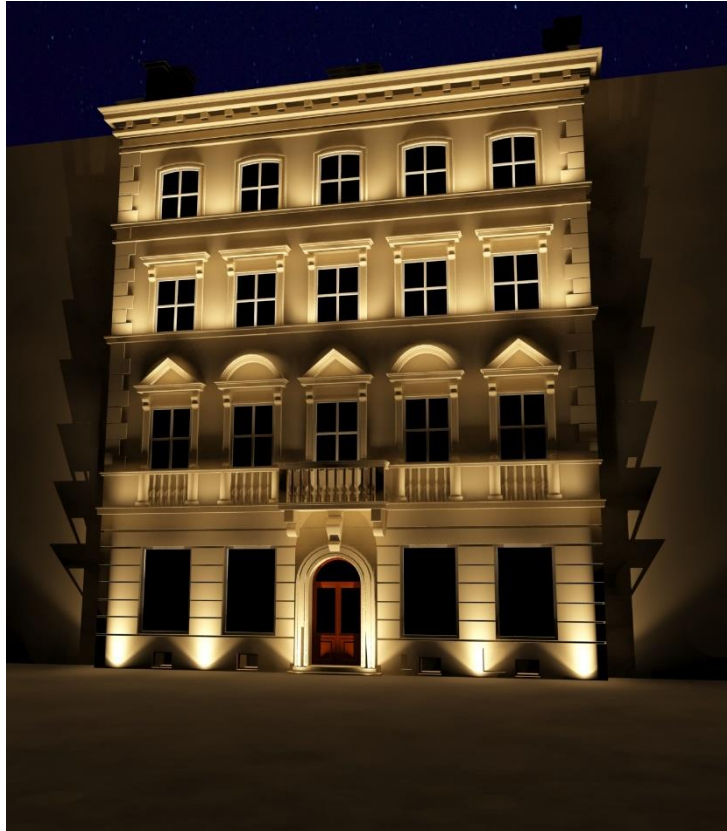
*brak danych



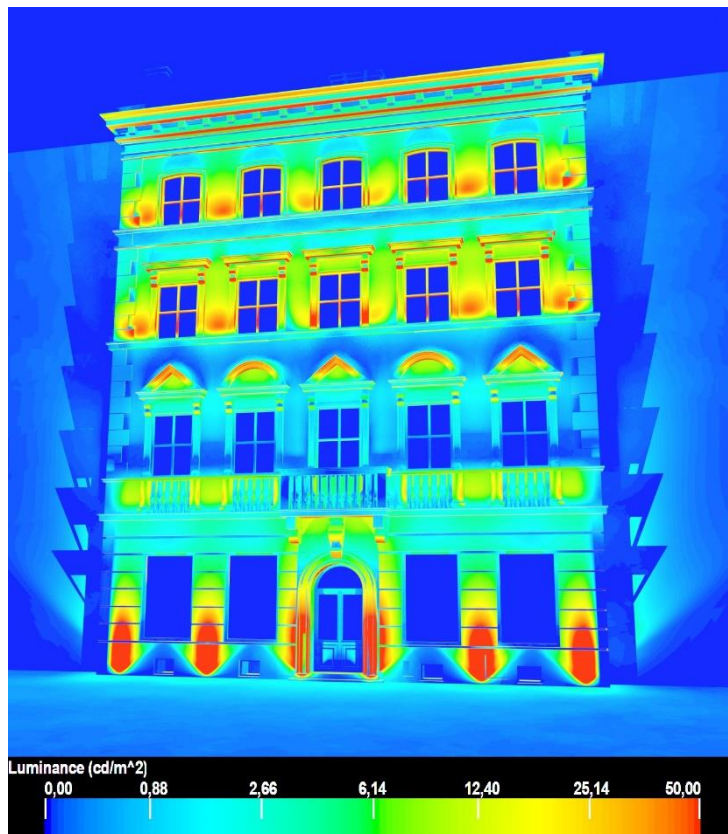
Rys. 4.16. Wizualizacja komputerowej koncepcji zalewowej iluminacji kamieniczki na ul. Krakowskie Przedmieście 65 w Warszawie



Rys. 4.17. Rozkład luminancji koncepcji zalewowej iluminacji kamieniczki na ul. Krakowskie Przedmieście 65 w Warszawie



Rys. 4.18. Wizualizacja komputerowa koncepcji punktowej iluminacji kamieniczki na ul. Krakowskie Przedmieście 65 w Warszawie



Rys. 4.19. Rozkład luminancji koncepcji punktowej iluminacji kamieniczki na ul. Krakowskie Przedmieście 65 w Warszawie

4.2.5. Obiekt nowoczesny

Krótki opis koncepcji iluminacji zalewowej (rys. 4.20 – 4.23):

Iluminacja następuje z dystansu ze słupów oświetleniowych. Ze względu na stosunkowo duży udział powierzchni szklanych, postanowiono najbardziej oświetlić z dużą równomiernością te powierzchnie, które charakteryzują się odbiciem dyfuzyjnym. Dodatkowo, większe luminancje przewidziano dla obszarów obiektu położonych wyżej.

Krótki opis koncepcji iluminacji punktowej (rys. 4.24 – 4.27):

Koncepcja punktowa sprowadza się do oświetlenia krawędziowego głównych powierzchni obiektu. Przewiduje się zastosowanie linii świetlnych, tak aby największe poziomy luminancji widoczne były przy obszarach krawędzi obiektu. Dodatkowo następuje doświetlenia powierzchni nad wejściem głównym, gdzie znajdują się tablice informacyjne oraz Godło państwowe. Od drugiej strony, dół obiektu oświetlony jest za pomocą doziemnych opraw z rozsyłem asymetrycznym.

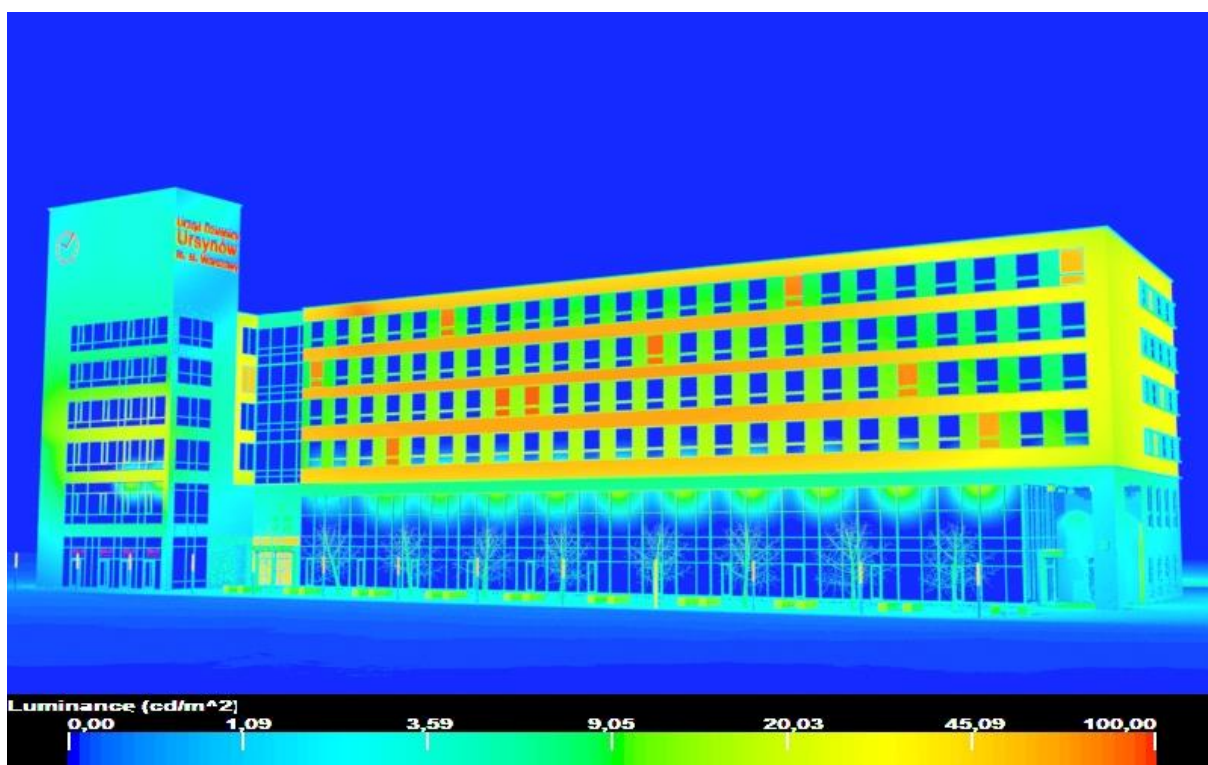
Tablica 4.5. Zestawienie podstawowych danych sprzętu oświetleniowego zastosowanego do poszczególnych koncepcji iluminacji Ratusza Ursynów w Warszawie

L.p.	Typ	Rozsył	Liczba	Typ źródła	T_c [K]	P_0 [W]	P_{op} [W]	Φ_0 [lm]	Φ_{op} [lm]	η_{op} [%]
Koncepcja zalewowa										
1.	A8	obrotowo–symetryczny szeroki	12	LED	3000	15,7	18,7	2855	2118	74
2.	B8	obrotowo–symetryczny średni	6	LED	3000	15,7	18,7	1971	2855	69
3.	C8	asymetryczny	35	LED	4000	–*	330	50000	42500	85
4.	D8	obrotowo–symetryczny średni	3	MH	4000	400	460	50746	34000	67
		SUMA:	56			P_c [kW]	13,27			
Koncepcja punktowa										
1.	A9	Obrotowo–symetryczny szeroki	12	LED	3000	15,7	18,7	2855	2118	74
2.	B9	obrotowo–symetryczny średni	6	LED	3000	15,7	18,7	1971	2855	69
3.	C9	osiowo–symetryczny	322	LED	4000	40	46	5000	2787	56
4.	D9	asymetryczny	38	LED	400	16	18,5	2860	1617	57
5.	E9	obrotowo–symetryczny wąski	2	LED	400	150	175	14000	7560	54
		SUMA:				P_c [kW]	16,20			

*brak danych



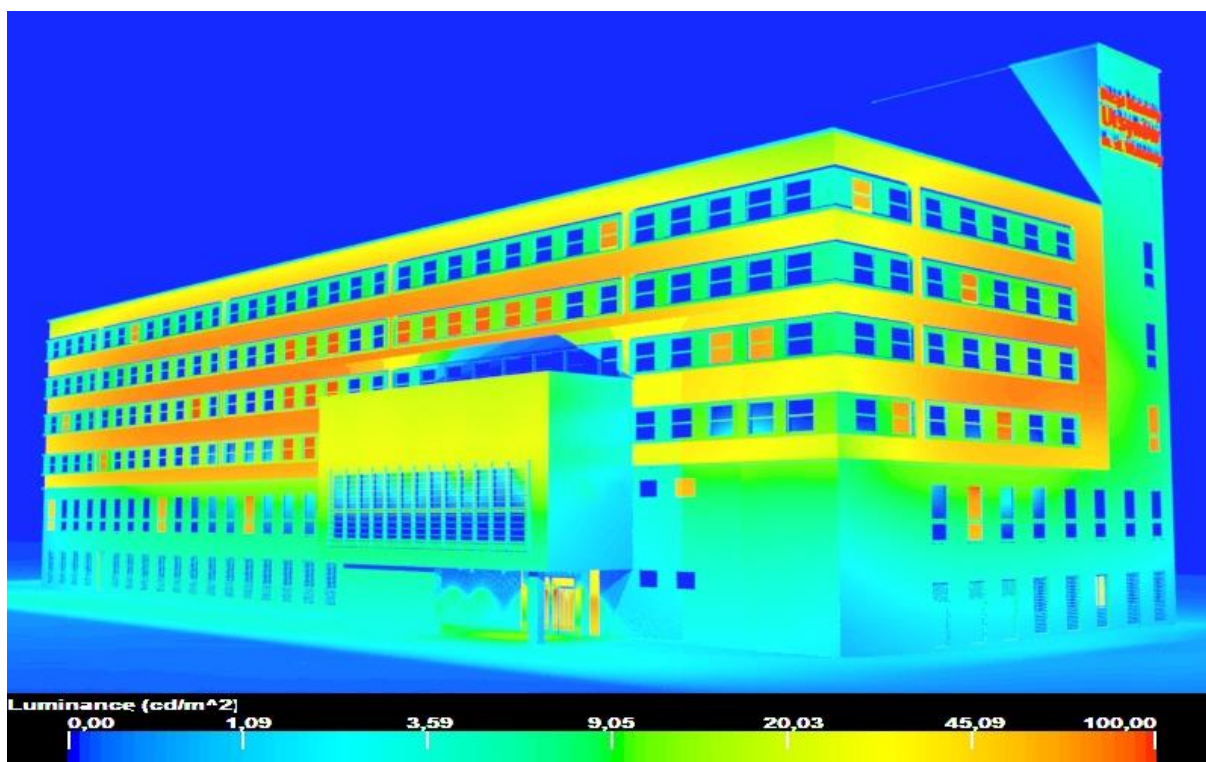
Rys. 4.20. Wizualizacja komputerowa koncepcji zalewowej iluminacji Ratusza Ursynów – widok 1



Rys. 4.21. Rozkład luminancji koncepcji zalewowej iluminacji Ratusza Ursynów – widok 1



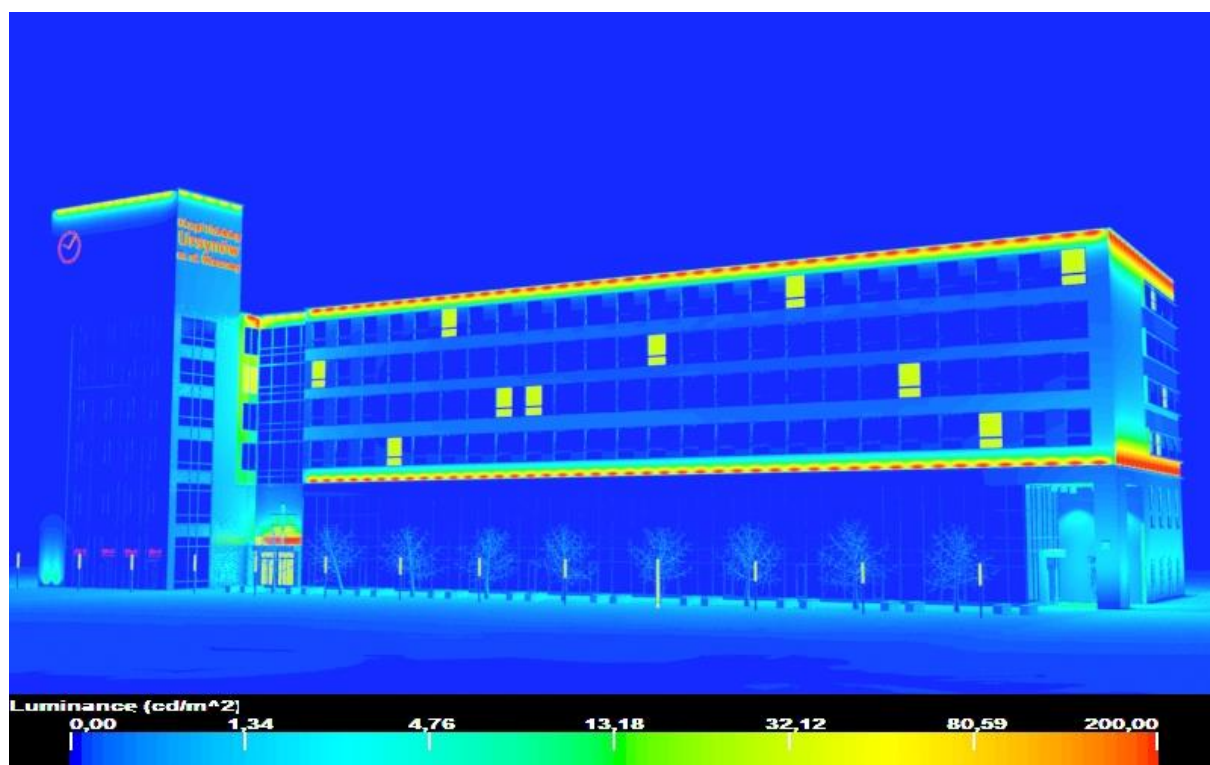
Rys. 4.22. Wizualizacja komputerowa koncepcji zalewowej iluminacji Ratusza Ursynów – widok 2



Rys. 4.23. Rozkład luminancji koncepcji zalewowej iluminacji Ratusza Ursynów – widok 2



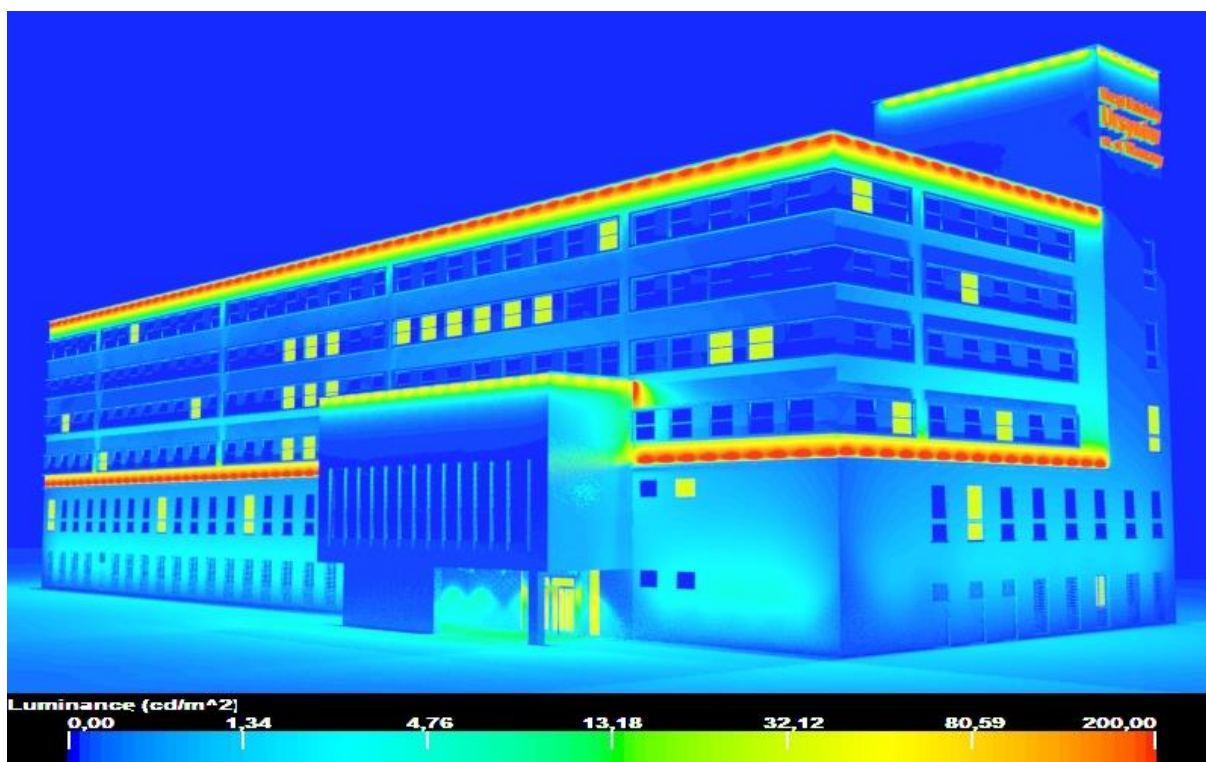
Rys. 4.24. Wizualizacja komputerowa koncepcji punktowej iluminacji Ratusza Ursynów – widok 1



Rys. 4.25.. Rozkład luminancji koncepcji punktowej iluminacji Ratusza Ursynów – widok 1



Rys. 4.25. Wizualizacja komputerowa koncepcji punktowej iluminacji Ratusza Ursynów – widok 2



Rys. 4.27. Rozkład luminancji koncepcji punktowej iluminacji Ratusza Ursynów – widok 2

4.3. Wyniki obliczeń sprawności iluminacji dla wytypowanych obiektów

Tablica 4.6. Zestawienie danych wykorzystywanych w Metodzie Sześcianu i wyników obliczeń strumienia świetlnego użytecznego i nieużytecznego dla poszczególnych koncepcji iluminacji wytypowanych obiektów

Obiekt	Metoda	Bok sześcianu	Oczko siatki	Punkty (liczba)	Φ_{t0}	Φ_{top}	Φ_u	Φ_{nu}
					[lm]	[lm]	[lm]	[lm]
rozłożysty	zalewowa	100 m	1 m	60000	180000	130680	39720	90960
	punktowa	100 m	1 m	60000	403503	310057	162962	147095
strzelisty	zalewowa	100 m	1 m	60000	890050	667319	357989	309330
	punktowa	100 m	1 m	60000	757720	504309	163134	341175
inżynierski	mieszana	1500 m	10 m	375000	1894860	1164840	323596	841244
pierzei	zalewowa	50 m	1 m	15000	30400	19462	12830	6632
	punktowa	50 m	1 m	15000	24828	14370	10032	4338
nowoczesny	zalewowa	300 m	2 m	135000	1948324	1632046	1088934	543112
	punktowa	300 m	2 m	135000	1792766	1016526	587596	428930

W tablicy 4.6 zostały zebrane wszystkie dane, które posłużyły do obliczeń nowych parametrów oceny dla wszystkich pięciu obiektów iluminacji przedstawionych w tym rozdziale. Przedstawiono również parametry związane z zastosowaną Metodą Prostopadłościanu (Sześcianu), poprzez podanie długości boku sześcianu, który posłużył do obliczeń, a także wielkość oczka siatki obliczeniowej i liczbę punktów obliczeniowych. Bok sześcianu w poszczególnych przypadkach, a także dyskretyzacja siatki na poszczególnych ścianach nie zostały określone w losowy sposób. Obliczenia poprzedziła analiza tych parametrów i wartości pokazane w tabeli są tymi, dla których spełniony jest warunek

„zapewnienia dostatecznie dużych płaszczyzn obliczeniowych, o odpowiednio dużej dyskretyzacji. Wszystkie zastosowane oprawy oświetleniowej znajdowały się w środku sześcianu, który posłużył do obliczeń. W praktyce projektowo-obliczeniowej przekłada się to na fakt, że począwszy od podanej wielkości boku sześcianu oraz wielkości oczka siatki obliczeniowej, które są podane w tablicy 4.6, nie następują już zmiany w uzyskanych wartościach poszczególnych parametrów. Całkowity strumień świetlny nieużyteczny, emitowany przez zastosowane oprawy oświetleniowej jest wychwytywany przez poszczególne płaszczyzny, co przede wszystkim warunkuje poprawność metody oraz wiarygodność uzyskanych wyników.

Uwagę zwraca, że w większości przypadków wystarczające okazywało się stworzenie sześcianu o wymiarach dwukrotnie większych niż iluminowany obiekt, z oczkiem siatki wynoszącym 1m, co dało kilkanaście lub kilkadziesiąt tysięcy punktów obliczeniowych

na powierzchni całego sześcianu. Jest to bardzo dobra wiadomość, ponieważ w przypadku znacznego zwiększenia liczby punktów obliczeniowych, w znaczny sposób wydłuża się czas obliczeń z kilku lub kilkunastu minut do kilku lub kilkunastu godzin. Dzieje się tak zwłaszcza, gdy w projekcie iluminacji jest zastosowana bardzo duża liczba opraw oświetleniowych, tak jak w przypadku obiektu inżynierskiego – mostu wantowego (największa liczba opraw oświetleniowych oraz największa liczba punktów obliczeniowych). Tym nie mniej, zaprezentowane obliczenia świadczą o tym, że tego typu analiza w iluminacji jest jak najbardziej możliwa. Oczywiście wpływ na to ma również moc obliczeniowa komputera, co jednak nie jest poddawane szczegółowym badaniom w niniejszej pracy.

Analizując uzyskane wartości strumienia użytecznego (tablica 4.6), można zauważyć, że nie jest on bezpośrednio związany z daną metodą iluminacji. Ogólne przyczyny braku związku wartości strumienia świetlnego użytecznego i nieużytecznego z metodą iluminacji wynikają najprawdopodobniej braku ścisłych przesłanek wyboru mocy i rozsyłów opraw oświetleniowych z oczekiwaną wartością luminancji średniej iluminacji. Należy jednak zaznaczyć, że nieadekwatność uwidacznia się dopiero na poziomie ilościowym analizy projektu iluminacji. Kwestie jakościowe, pod względem poprawności efektu estetycznego są jak najbardziej odpowiednie.

Tablica 4.7. Zestawienie wyników obliczeń nowych parametrów oraz luminancji uzyskanej dla poszczególnych koncepcji iluminacji wytypowanych obiektów

Obiekt	Metoda	L_z	ρ_{sr}	S	η_{max}	η_{il}	ww_{il}	η_{en}	L_u	L_p
		$[\frac{cd}{m^2}]$	$[-]$	$[m^2]$	$[%]$	$[%]$	$[%]$	$[%]$	$[\frac{cd}{m^2}]$	$[%]$
rozłożysty	zalewowa	4	0,40	1450	73	22	30	16	19,2	4,8
	punktowa				77	40	53	31	14,3	3,6
strzelisty	zalewowa	6	0,30	3200	75	40	53	30	10,7	1,8
	punktowa				67	22	33	14	4,9	0,8
inżynierski	mieszana	12	0,35	10000	61	17	28	10	3,6	0,3
pierzei	zalewowa	12	0,50	220	64	42	66	27	9,3	0,8
	punktowa				58	40	70	23	7,3	0,6
nowoczesny	zalewowa	12	0,25	4600	84	56	67	47	26,4	2,2
	punktowa				57	33	58	19	14,2	1,2

W tablicy 4.7 zostały przedstawione wyniki obliczeń parametrów: sprawności iluminacji, maksymalnej sprawności iluminacji, wskaźnika wykorzystania sprawności iluminacji, sprawności energetycznej iluminacji oraz luminancji uzyskanej (luminancja średnia). Podano w niej również wartość średniego współczynnika odbicia dla danego obiektu, wielkości oświetlanej powierzchni, wartość średniej luminancji, na którą

projektowano dane rozwiązanie, a także przewymiarowanie uzyskane w wyniku podzielenia wartości luminancji obliczonej przez wartość luminancji projektowanej.

Uzyskane wartości maksymalnej sprawności iluminacji są rzędu 70%. Oznacza to, że około 30% strumienia świetlnego jest tracone w układach optycznych opraw oświetleniowych, negatywnie wpływając na efektywność energetyczną rozwiązania iluminacyjnego. Wprowadza to jednocześnie postulat stosowania sprzętu jak najwyższej jakości oraz takiego, dla którego producent podaje dokładne, podstawowe dane ilościowe (strumień źródła, strumień oprawy, sprawność oprawy, bryła fotometryczna).

Uzyskane wartości sprawności iluminacji są stosunkowo małe (rzędu ok. 35%), co jest zgodne z pomiarami przedstawionymi w rozdziale 3.1. Najniższa wartość sprawności iluminacji uwidacznia się dla przypadku iluminacji mostu wantowego (17%), co może być tłumaczone dużymi odległościami, z której następuje oświetlenie względem stosunkowo małych powierzchni do oświetlenia (wanty). Największa wartość sprawności iluminacji została uzyskana dla iluminacji obiektu nowoczesnego metodą zalewową (56%). Oznacza to, że najwięcej strumienia świetlnego ze źródeł światła dociera do powierzchni obiektu spośród wszystkich iluminowanych przypadków. Jednak nie jest to tożsame z najmniejszym zanieczyszczeniem środowiska, ze względu na charakter odbicia (dominuje charakter kierunkowy) oraz ze względu na zmianę wartości współczynnika odbicia powierzchni szklanych względem kąta padania na nie strumienia świetlnego. Duże wartości tego parametru (40%) uzyskano również dla metody punktowej w oświetleniu obiektu rozłożystego, metody zalewowej obiektu strzelistego oraz obydwu metod iluminacji obiektu zlokalizowanego w pierzei. Ponadto, uzyskane ogólnie, niskie wartości sprawności iluminacji są tym bardziej zastanawiające, zwłaszcza że we wszystkich analizowanych przypadkach, uzyskany efekt estetyczny jest zgodny z zasadami sztuki iluminacji. Dodatkowo nie stwierdza się jednoznacznie, aby dana metoda iluminacji (zalewowa lub punktowa) cechowała się znacznie lepszymi wartościami sprawności iluminacji.

Analizując wskaźnik wykorzystania sprawności iluminacji, można określić, że jego średnia wartość dla wszystkich dziewięciu przypadków wynosi ok. 50%. Oznacza to, że połowa strumienia świetlnego wyemitowanego z opraw oświetleniowych nie trafia w wyznaczone do oświetlenia powierzchnie i rozprasza się w przestrzeni wokół obiektu. Fakt ten, jak również maksymalna sprawność iluminacji na poziomie 70%, warunkują stwierdzenie, że dany projekt iluminacji może być poprawiony pod względem wartości parametrów oceny efektywności energetycznej iluminacji i zanieczyszczenia światłem prawie dwukrotnie.

Natomiast parametr energetycznej sprawności iluminacji jest rzędu 25%. Oznacza to, że 75% mocy instalowanej w danym obiekcie stanowi straty energetyczne danego rozwiązania oświetleniowego. Warunkuje to duże możliwości poprawy projektu iluminacji pod względem efektywnego przetwarzania energii.

Ponadto, dla wszystkich przypadków została obliczona średnia wartość luminancji (luminancja uzyskana) oraz odniesienie do zakładanego poziomu luminancji (luminancja zakładana), na który projekt został wykonywany. Do tej pory nie było to praktykowane, mimo wymagań stawianych w raporcie technicznym [51]. Ocena luminancji średniej odbywała się na podstawie organoleptycznej analizy uzyskanego rozkładu luminancji danego rozwiązania oświetleniowego. Jak już wspomniano wcześniej, ten sposób generował duże błędy i rozbieżności w odczycie średniej wartości luminancji danego projektu. Uzyskane wartości (o pewnym zaokrągleniu), a także odniesienie jej do wartości projektowanej (przewymiarowanie luminancji), pokazują czy, i w jakim stopniu udało się spełnić założenia. Dla przykładu, dla metody zalewowej oświetlenia obiektu rozłożystego uzyskano ok. 19 cd/m^2 . Jest to wartość około czterokrotnie większa niż jest to wymagane (ze względu na lokalizację obiektu na uboczu, w miejscu gdzie jest bardzo niski poziom luminancji otoczenia). Oznacza to, że można z powodzeniem czterokrotnie zmniejszyć moce zastosowanych opraw oświetleniowych, uzyskując podobny efekt estetyczny, przy znacznie mniejszym poborze energii. Obliczanie przewymiarowania luminancji umożliwia również reakcję w przypadku, gdy uzyskany poziom średniej luminancji jest niższy niż projektowany – obiekt inżynierski oraz obiekt zlokalizowany w pierzei. W tych przypadkach należałoby zadbać o zwiększenie poziomu luminancji średniej ze względu na położenie w miejscu, gdzie otoczenie jest bardzo jasne: centrum dużego miasta (obiekt w pierzei) lub obserwacja następuje z bardzo dużej odległości (obiekt inżynierski).

Wyniki zawarte w tablicach 4.6 oraz 4.7, nie pozwalają wyciągnięcia daleko idących wniosków, które łączyłyby metodę iluminacji, rodzaj obiektu i uzyskane wartości parametrów oceny efektywności energetycznej i zanieczyszczenia światłem w iluminacji obiektów. Dla przykładu, przystępując do projektu iluminacji danego obiektu, nie wiadomo czy lepsze efektywność energetyczna zostanie uzyskana dla metody zalewowej czy punktowej. Ponadto, to nie efektywność energetyczna powinna decydować o wyborze metody iluminacji, lecz wizja estetyczna oraz względy, takie jak odległość obserwacji, architektura. Tym nie mniej, wydaje się, że zaproponowane nowe parametry oceny efektywności energetycznej i zanieczyszczenia światłem mogą być bardzo pomocne w ocenie inżynierskiej poprawności stworzonego projektu iluminacji i z pewnością różnicują konkretne rozwiązania.

5. MOŻLIWOŚCI ULEPSZANIA PROJEKTU ILUMINACJI

5.1. Metody ulepszania projektu iluminacji

5.1.1. Informacje ogólne

W rozdziale 4.2 zostały przedstawione wyniki obliczeń nowych parametrów oceny efektywności energetycznej i zanieczyszczenia światłem w iluminacji, dla pięciu typowych obiektów iluminacji w ujęciu wariantowym. Uzyskane poziomy nowych parametrów zostały określone jako stosunkowo niskie i dające duże możliwości poprawy projektu pod względem efektywności energetycznej, jak i redukcji zanieczyszczenia światłem. Z inżynierskiego punktu widzenia (ulepszanie efektywności energetycznej iluminacji i minimalizacji zanieczyszczenia światłem od niej powstającego), wydaje się że warto zadbać nie tylko o efekt estetyczny, lecz również o kwestie ilościowe. Potrzebne są metody ulepszania projektu, dające kontrolę nad omawianymi problemami. Należy jednak pamiętać, że efekt estetyczny jest w przypadku iluminacji kwestią nadrzędną. Niedopuszczalna jest sytuacja, w której nowe parametry oceny posiadają najwyższe możliwe wartości, lecz uzyskany efekt wizualny zamiast upiększać obiekt, poprzez podkreślenie jego walorów semantyczno–architektonicznych, oszpeca obiekt. Ocena efektu estetycznego, odbywać się będzie zatem dalej w subiektywny sposób na podstawie określonych empirycznie, dostępnych w literaturze zasad iluminacji i dobrych praktyk projektowych [3].

W toku badań, zakłada się, że do czynników wpływających w istotny sposób na efektywność energetyczną iluminacji i powstałe od niego zanieczyszczenie światłem należy:

- wycelowanie i rozmieszczenie opraw oświetleniowych,
- kształt bryły fotometrycznej,
- sprawność opraw oświetleniowych,
- rozkład widmowy promieniowania źródła światła i rozkład widmowy współczynnik odbicia materiału oświetlanego obiektu,
- w skrajnym przypadku: metoda iluminacji.

Wymienione powyżej czynniki mogą stanowić podstawy metod służących ulepszaniu projektu iluminacji. Są one bardzo złożone i właściwie nie możliwe jest analizowanie ich odrębnie. Przykładowo zmiana bryły fotometrycznej oprawy oświetleniowej jest również

związana ze zmianą sprawności danej oprawy. Poza tym, wniosek płynący ze zwiększania sprawności opraw wydaje się oczywisty: im wyższa sprawność oprawy, tym lepsza efektywność energetyczna danego rozwiązania przy jego odpowiednim zaprojektowaniu. Postanowiono zatem przedstawić analizę ulepszania projektu (pod względem efektywności energetycznej i zanieczyszczenia światłem) na podstawie trzech przykładów symulacyjno-obliczeniowych, które w najlepszy sposób przedstawiają ich wpływ zarówno na uzyskany poziom poszczególnych parametrów, jak i efekt wizualny. Przykłady opisane są w postaci podrozdziałów 5.1.2 – 5.2.4. Bazują one na projekcie iluminacji Białego Domku z Łazienkach Królewskich [185]. Został on wykonany z wykorzystaniem metod iluminacji przy zakładanej średniej luminancji na poziomie 12 cd/m^2 (ze względu na lokalizację w centrum miasta – dużą luminancję otoczenia).

METODA ZALEOWA (rys. 5.1 – 5.2):

Oświetlenie następuje z dystansu, pod dużym kątem celem zrealizowania asymetrycznego cieniowania obiektu i nadaniu mu odpowiedniej plastyczności. Dodatkowo, oświetla się okrągłe okno na górze obiektu, jako punkt przyciągania wzroku i najciekawszy detal architektoniczny geometrii obiektu.

METODA PUNKTOWA (rys. 5.3 – 5.4):

Koncepcja jest realizowana przy wykorzystaniu opraw doziemnych oświetlających pierwszą kondygnację obiektu. Wyższe partie oświetlone są za pomocą linii świetlnych (poniekąd oświetlenie metodą warstwową iluminacji), dzięki czemu uzyskuje się większe luminancje wyodrębniające określony rytm elewacji obiektu. Realizuje się również zasadę wzmacniania wysokości obiektu (im wyżej tym większa jasność elewacji).

Zestawienie danych zastosowanego sprzętu oświetleniowego znajduje się w tabelicy 5.1. Natomiast informacje o przyjętych parametrach obliczania strumienia użytecznego i nieużytecznego, średnim współczynniku odbicia, całkowitym strumieniu źródeł światła, opraw oświetleniowych, i maksymalnej sprawności iluminacji zawierają się w tabelicy 5.2.

Tablica 5.1. Zestawienie danych sprzętu oświetleniowego dla projektu iluminacji Białego Domku.

L.p.	Typ	Rozsył	Liczba	Typ źródła	T_c [K]	P_0 [W]	P_{op} [W]	Φ_0 [lm]	Φ_{op} [lm]	η_{op} [%]
Koncepcja zalewowa										
1.	A10	obrotowo –symetryczny średni	5	LED	4000	72,2	82	10365	7627	74
2.	B10	obrotowo –symetryczny wąski	3	LED	4000	12,5	15	1960	1111	57
3.	C10	obrotowo –symetryczny wąski	2	LED	4000	72,2	82	10365	5480	53
		SUMA:				P_c [kW]	0,62			
Koncepcja punktowa										
1.	A11	asymetryczny	6	LED	4000	36,6	45	2904	4370	66
2.	B11	osiowo –symetryczny	34	LED	4000	–*	15	867	775	89
		SUMA:				P_c [kW]	0,78			

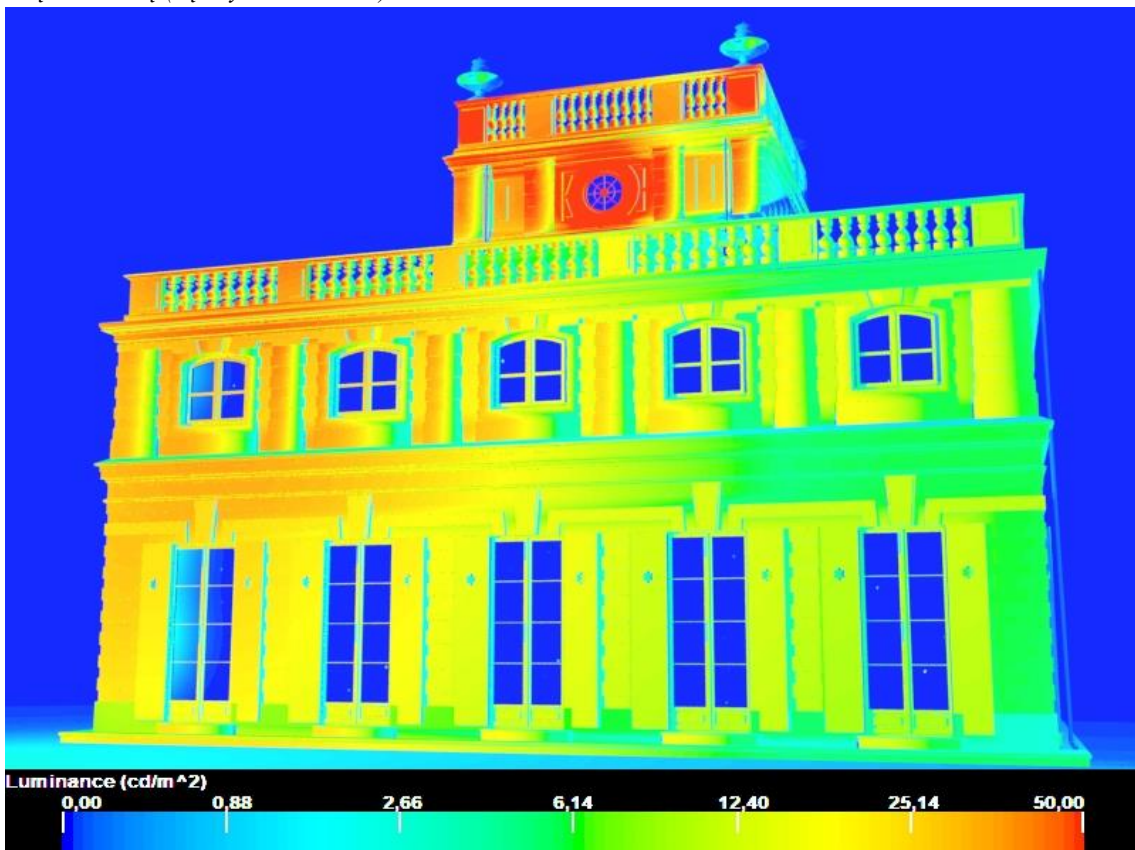
*brak danych

Tablica 5.2. Zestawienie danych obliczeniowych dla projektu iluminacji Białego Domku.

Obiekt	Metoda	ρ	S	Bok sześcianu	Oczko siatki	Punkty (liczba)	Φ_{t0}	Φ_{top}	η_{max}
		[–]	[m ²]				[lm]	[lm]	[%]
Biały Domek	zalewowa	0,6	153	50m	1m	15 000	78 435	52 428	67
	punktowa						55 698	43 774	79



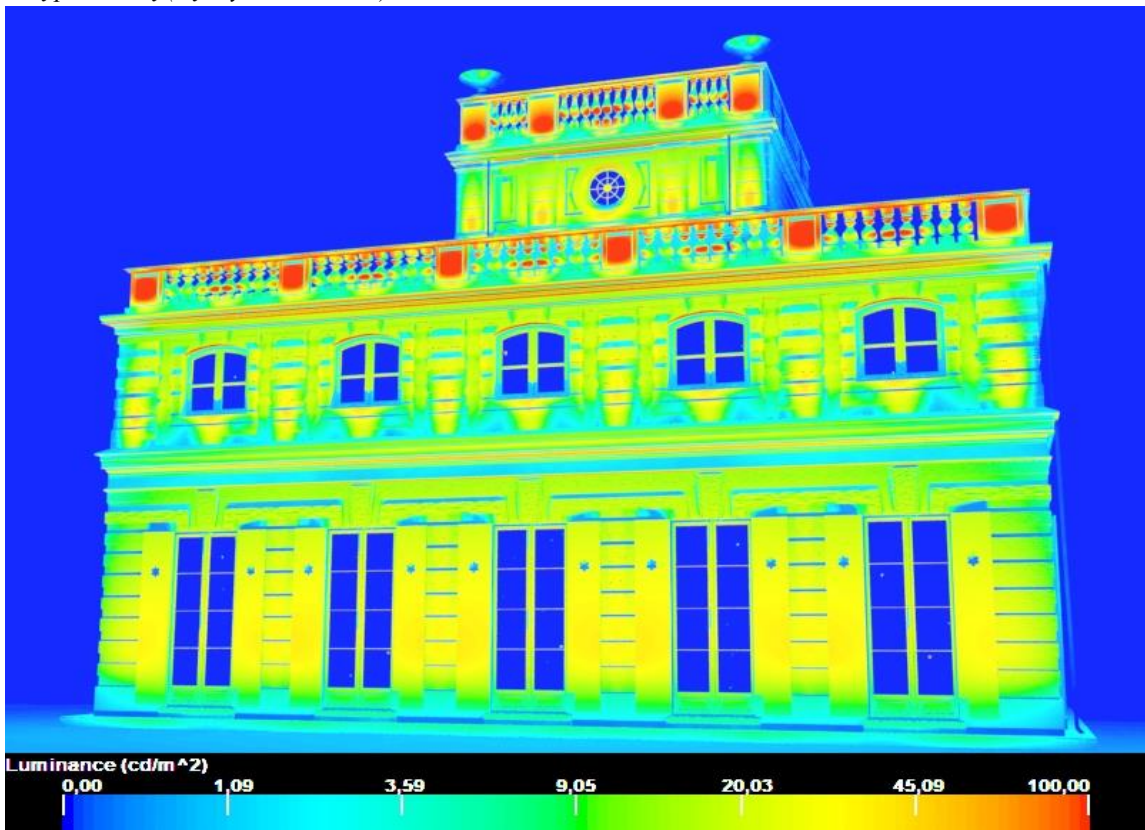
Rys. 5.1. Wizualizacja komputerowa iluminacji Białego Domku w Łazienkach Królewskich zrealizowanej metodą zalewową (kąt wycelowania 0°)



Rys. 5.2. Rozkład luminancji iluminacji Białego Domku w Łazienkach Królewskich zrealizowanej metodą zalewową (kąt wycelowania 0°)



Rys. 5.3. Wizualizacja komputerowa iluminacji Białego Domku w Łazienkach Królewskich zrealizowanej metodą punktową (kąt wycelowania 0°)



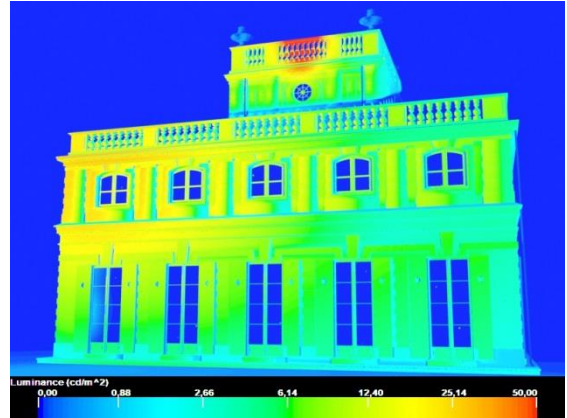
Rys. 5.4. Rozkład luminancji metody punktowej iluminacji Białego Domku w Łazienkach Królewskich zrealizowanej metodą (kąt wycelowania 0°)

5.1.2. Przykład symulacyjno–obliczeniowy 1: zmiana wycelowania opraw oświetleniowych i porównanie metod iluminacji

Przykład ma na celu pokazanie istoty wpływu wycelowania sprzętu oświetleniowego na kwestie efektywności energetycznej oraz zanieczyszczenia światłem w projekcie iluminacji. W tym celu wykonano obliczenia nowych parametrów przy zmianie nachylenia wszystkich opraw oświetleniowych w projekcie iluminacji Białego Domku od położenia pierwotnego (oznaczonego jako 0°), czyli takiego, dla którego zaprojektowano iluminację, i dla którego został spełniony zadowalający efekt estetyczny. Zakres kątów nachylenia kształtuje się od -20° do $+20^\circ$. Ujemne wartości kąta oznaczają, że oprawy oświetleniowe były odchylane w stronę przeciwną do elewacji obiektu, na dodatnie oznaczają nachylenie w kierunku elewacji. Obliczenia były przeprowadzane dla zmiany kąta nachylenia z krokiem 1° w płaszczyźnie pionowej. Wyniki obliczeń zostały przedstawione w tablicach 5.3 (metoda zalewowa) oraz 5.4 (metoda punktowa), gdzie przedstawiono charakterystykę zmian sprawności energetycznej dla danej koncepcji iluminacji względem kąta nachylenia opraw oświetleniowych. Przedstawiono również wizualizacje i rozkłady luminancji z krokiem 5° (kwestia dokładności wydruku). Umożliwia to w jak najlepszym stopniu unaocznic powstałe zmiany w efekcie estetycznym oraz rozkładzie luminancji powstałe w wyniku zmiany nachylenia opraw oświetleniowych. Rys. 5.5 – 5.20 odnoszą się do koncepcji zalewowej, natomiast 5.24 – 5.41 do koncepcji punktowej. Dla każdej koncepcji iluminacji przedstawiono charakterystykę zmian sprawności energetycznej iluminacji w funkcji kąta wycelowania opraw oświetleniowych (rys. 5.21 i 5.42). Zestawiono również efekt pierwotny (0°) oraz taki, który przedstawia warunki zaistniałe po zmianie nachylenia do odpowiedniego kąta, i dla którego moc została zredukowana względem przewymiarowania powstałego z obliczeń luminancji. Zostało to również odpowiednio skomentowane.



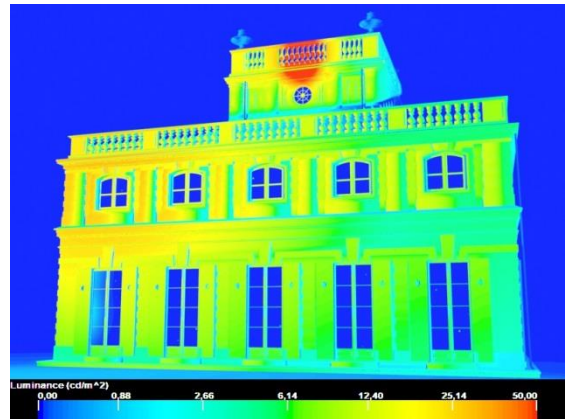
Rys. 5.5. Metoda zalewowa (wizualizacja): -20°



Rys. 5.6. Metoda zalewowa (luminancje): -20°



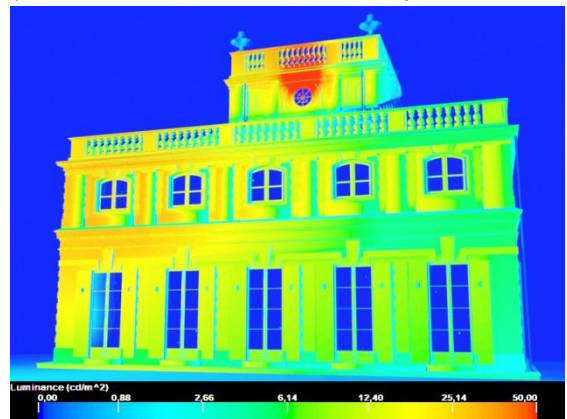
Rys. 5.7. Metoda zalewowa (wizualizacja): -15°



Rys. 5.8. Metoda zalewowa (luminancje): -15°



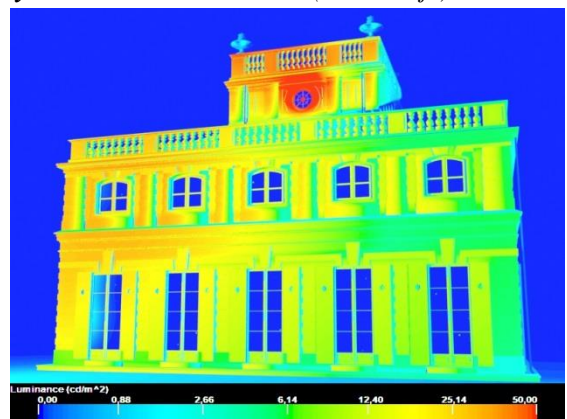
Rys. 5.9. Metoda zalewowa (wizualizacja): -10°



Rys. 5.10. Metoda zalewowa (luminancje): -10°



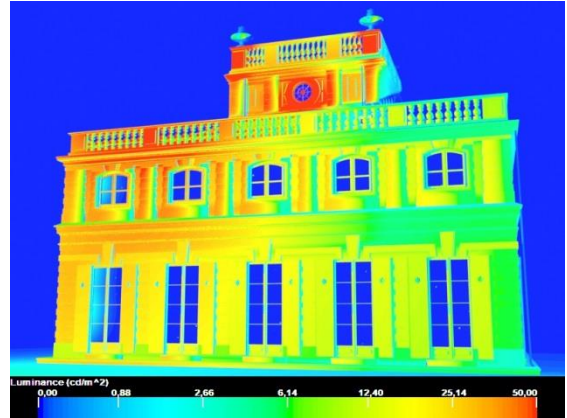
Rys. 5.11. Metoda zalewowa (wizualizacja): -5°



Rys. 5.12. Metoda zalewowa (luminancje): -5°



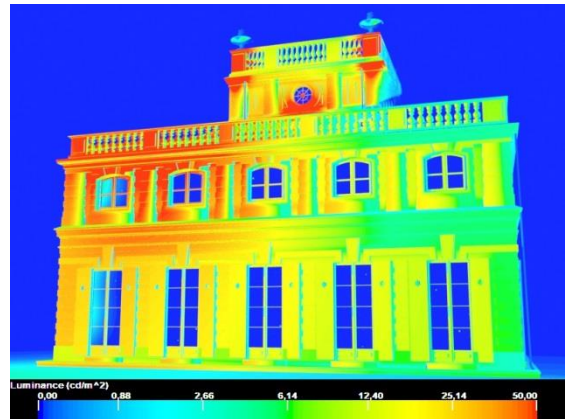
Rys. 5.13. Metoda zalewowa (wizualizacja): +5°



Rys. 5.14. Metoda zalewowa (luminancje): +5°



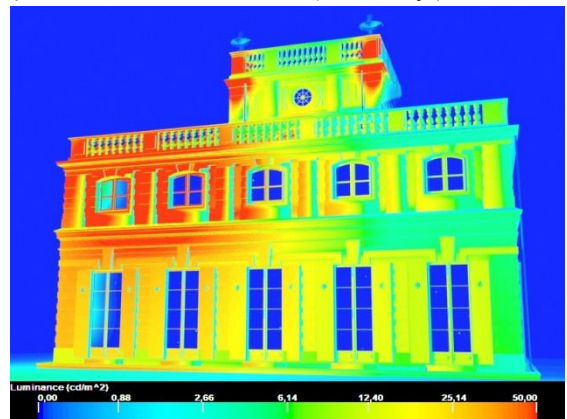
Rys. 5.15. Metoda zalewowa (wizualizacja): +10°



Rys. 5.16. Metoda zalewowa (luminancje): +10°



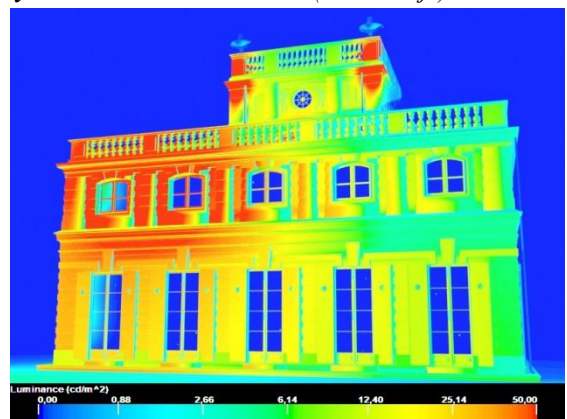
Rys. 5.17. Metoda zalewowa (wizualizacja): +15°



Rys. 5.18. Metoda zalewowa (luminancje): +15°



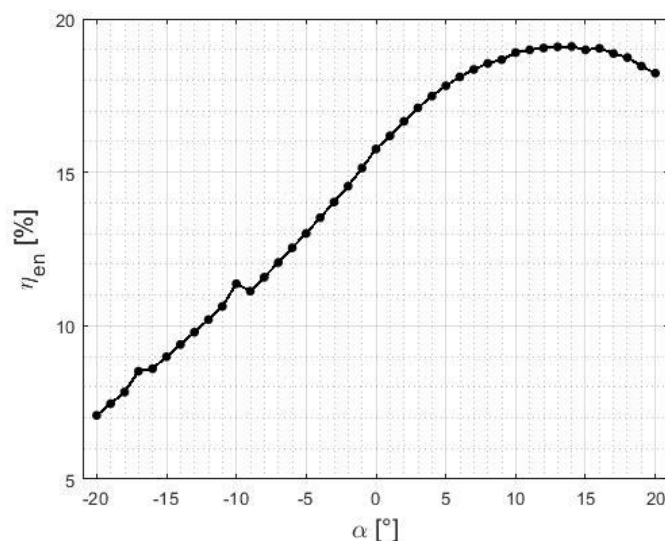
Rys. 5.19. Metoda zalewowa (wizualizacja): +20°



Rys. 5.20. Metoda zalewowa (luminancje): +20°

Tablica 5.3. Zestawienie wyników obliczeń nowych parametrów oceny efektywności energetycznej i zanieczyszczenia światłem dla iluminacji Białego Domku metodą zalewową w przykładzie obliczeniowym 1

α	η_{il}	ww_{il}	η_{en}	L_u	L_p
[°]	[%]	[%]	[%]	$\left[\frac{cd}{m^2}\right]$	[-]
-20	11	16	7	10,4	0,9
-19	11	17	7	11,0	0,9
-18	12	18	8	11,5	1,0
-17	13	19	9	12,5	1,0
-16	13	19	9	12,6	1,1
-15	13	20	9	13,2	1,1
-14	14	21	9	13,7	1,1
-13	15	22	10	14,3	1,2
-12	15	23	10	15,0	1,3
-11	16	24	11	15,5	1,3
-10	17	25	11	16,6	1,4
-9	17	25	11	16,3	1,4
-8	17	26	12	17,0	1,4
-7	18	27	12	17,6	1,5
-6	19	28	13	18,3	1,5
-5	19	29	13	19,0	1,6
-4	20	30	14	19,8	1,7
-3	21	31	14	20,5	1,7
-2	22	33	15	21,3	1,8
-1	23	34	15	22,2	1,9
0	24	35	16	23,0	1,9
+1	24	36	16	23,7	2,0
+2	25	37	17	24,4	2,0
+3	26	38	17	25,0	2,1
+4	26	39	17	25,6	2,1
+5	27	40	18	26,1	2,2
+6	27	41	18	26,5	2,2
+7	27	41	18	26,8	2,2
+8	28	42	19	27,1	2,3
+9	28	42	19	27,3	2,3
+10	28	42	19	27,6	2,3
+11	28	42	19	27,8	2,3
+12	29	43	19	27,9	2,3
+13	29	43	19	27,9	2,3
+14	29	43	19	27,9	2,3
+15	28	43	19	27,8	2,3
+16	28	43	19	27,8	2,3
+17	28	42	19	27,6	2,3
+18	28	42	19	27,4	2,3
+19	28	41	18	27,0	2,3
+20	27	41	18	26,7	2,2



Rys. 5.21. Zależność sprawności energetycznej iluminacji w funkcji kąta wycelowania opraw dla metody zalewowej iluminacji Białego Domku w przykładzie obliczeniowym 1

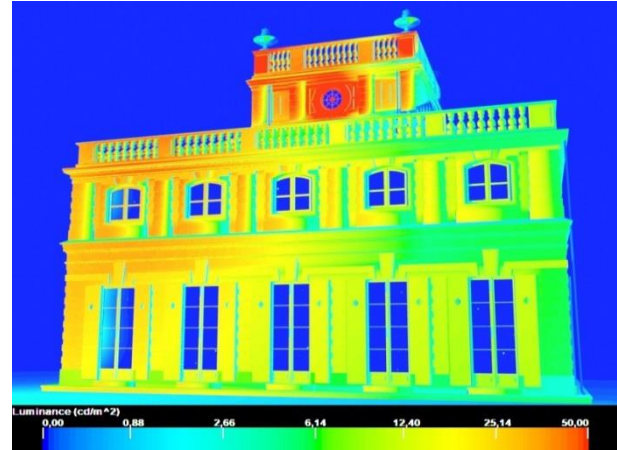
Na podstawie przeprowadzonych obliczeń dla metody zalewowej można zauważyć, że nowe parametry oceny są mało wrażliwe na zmiany nachylenia opraw oświetleniowych. Jednak odchylenie opraw oświetleniowych powoduje większe zmiany rzędu kilkunastu punktów procentowych (spadek wartości parametrów) niż nachylenie w kierunku elewacji (zmiany o zaledwie kilka punktów procentowych). Niewielkie zmiany uwidaczniają się również w uzyskanych wartościach luminancji średniej dla kątów wycelowania od $+8^\circ$ do $+19^\circ$. Różnice w poziomie luminancji są na tyle małe, że na pewno nie są możliwe do określenia poprzez ludzki narząd wzroku. Tym nie mniej, następuje poprawa w wykorzystaniu energii elektrycznej. Energetyczna sprawność iluminacji przyjmuje wartość 15% dla położenia pierwotnego i 19% dla kąta wycelowania z zakresu od $+8^\circ$ do $+18^\circ$.

Istotne zmiany uwidaczniają się natomiast w uzyskanym efekcie estetycznym (wizualizacje oraz rozkład luminancji). Oceniono (subiektywnie), że powyżej zmiany kąta wycelowania o $+10^\circ$, zmiany w pierwotnej koncepcji iluminacji zalewowej tego obiektu są już zbyt duże i niezalecane (pomimo dalszej poprawy parametrów względem kąta nachylenia).

Przewymiarowanie luminancji określono na poziomie 2,3 raza, co oznacza, że w praktyce można zastosować oprawy o 2,3 krotnie niższym strumieniu świetlny lub też ściemnić obecne do referencyjnego poziomu 12 cd/m^2 poprzez zastosowanie systemu sterowania.



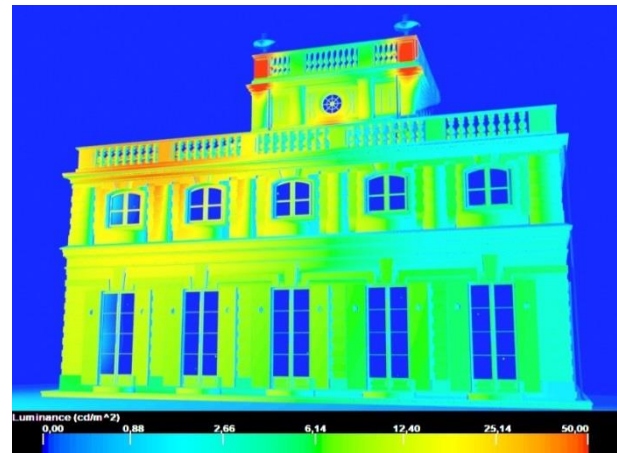
Rys. 5.22. Wizualizacja komputerowa iluminacji Białego Domku dla metody zalewowej (rendering wyjściowy)



Rys. 5.23. Rozkład luminancji iluminacji Białego Domku dla metody zalewowej (rendering wyjściowy)



Rys. 5.24. Wizualizacja komputerowa iluminacji Białego Domku dla metody zalewowej po zmianie wycelowania i redukcji mocy

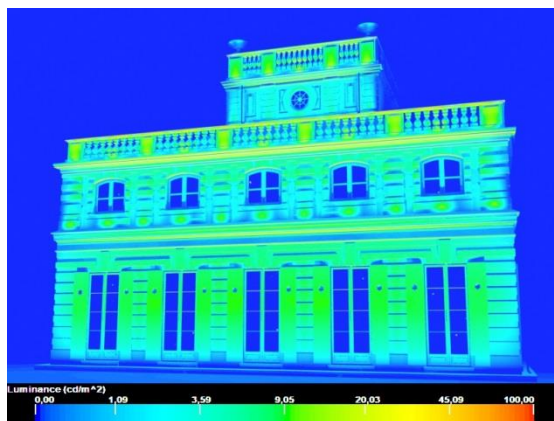


Rys. 5.25. Rozkład luminancji iluminacji Białego Domku dla metody zalewowej po zmianie wycelowania i redukcji mocy

Na rys. 5.22 i 5.23 przedstawiono wizualizację i rozkład luminancja dla pierwotnego wycelowania opraw oświetleniowych. Natomiast rys. 5.24 i 5.25 przedstawiają wizualizację oraz rozkład luminancji uzyskane dla zmiany kąta nachylenia wycelowania opraw oświetleniowych o $+10^\circ$ oraz przy zmniejszeniu mocy opraw (strumienia świetlnego) 2,3 krotnie. Średnia luminancja w tym przypadku jest na poziomie 12 cd/m^2 . Projekt iluminacji Białego Domku metodą zalewową został zatem ulepszony zarówno pod względem efektywności energetycznej, jak i zmniejszony został nieco poziom zanieczyszczenia światłem.



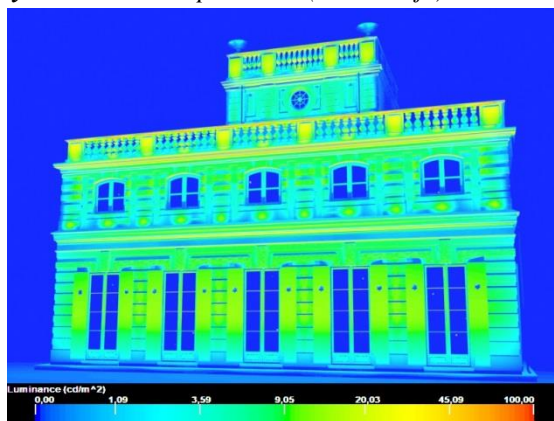
Rys. 5.26. Metoda punktowa (wizualizacja): -20°



Rys. 5.27. Metoda punktowa (luminancje): -20°



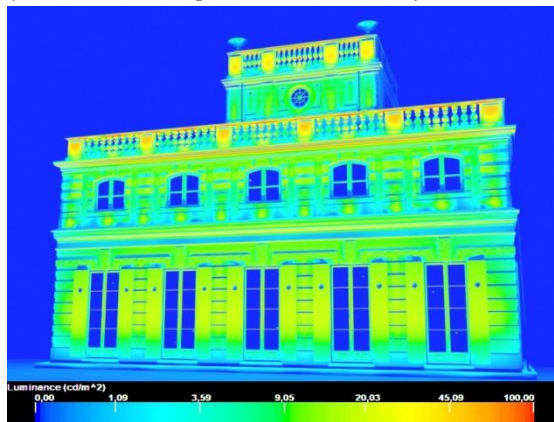
Rys. 5.28. Metoda punktowa (wizualizacja): -15°



Rys. 5.29. Metoda punktowa (luminancje): -15°



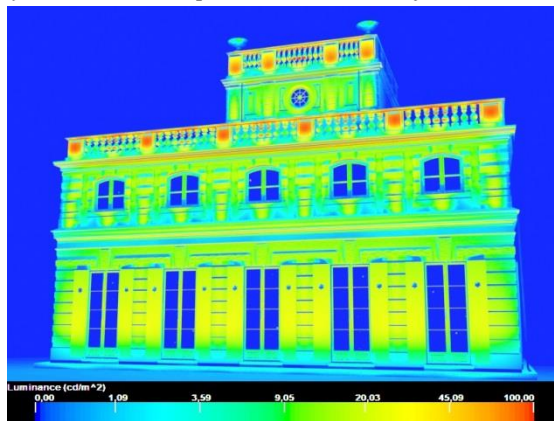
Rys. 5.30. Metoda punktowa (wizualizacja): -10°



Rys. 5.31. Metoda punktowa (luminancje): -10°



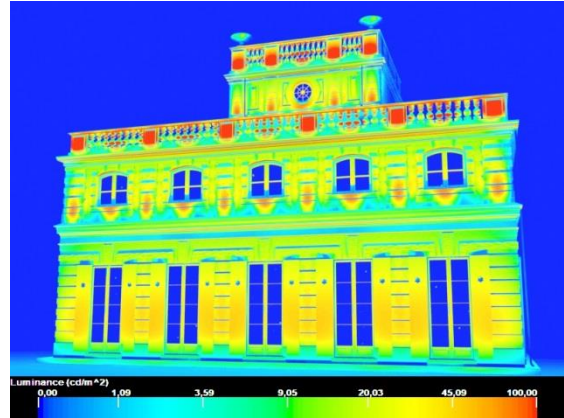
Rys. 5.32. Metoda punktowa (wizualizacja): -5°



Rys. 5.33. Metoda punktowa (luminancje): -5°



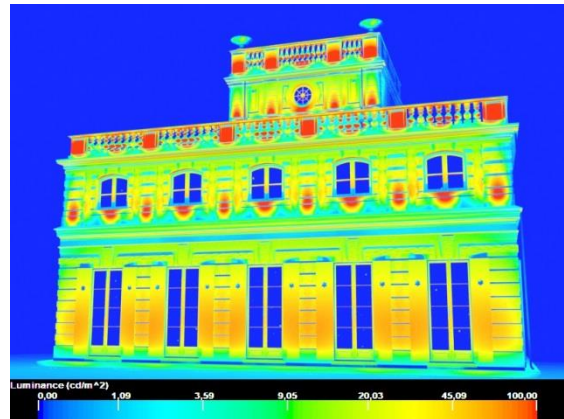
Rys. 5.34. Metoda punktowa (wizualizacja): +5°



Rys. 5.35. Metoda punktowa (luminancje): +5°



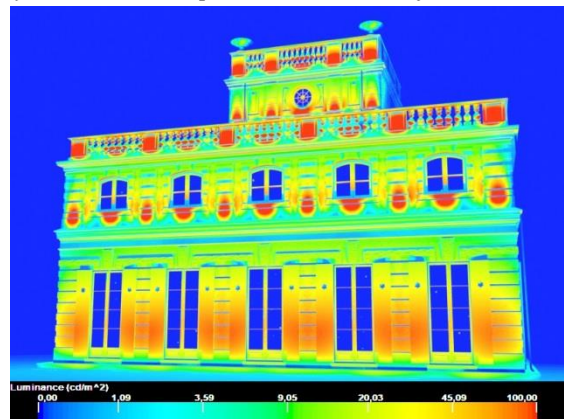
Rys. 5.36. Metoda punktowa (wizualizacja): +10°



Rys. 5.37. Metoda punktowa (luminancje): +10°



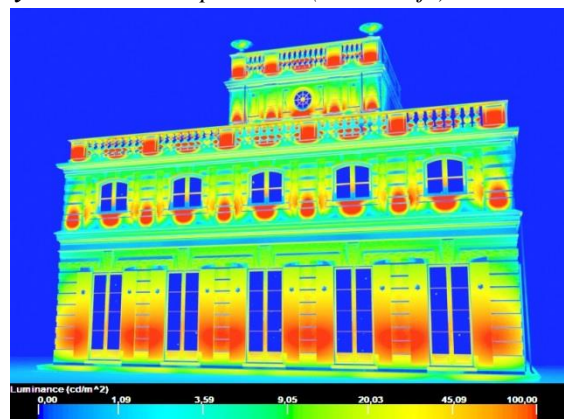
Rys. 5.38. Metoda punktowa (wizualizacja): +15°



Rys. 5.39. Metoda punktowa (luminancje): +15°



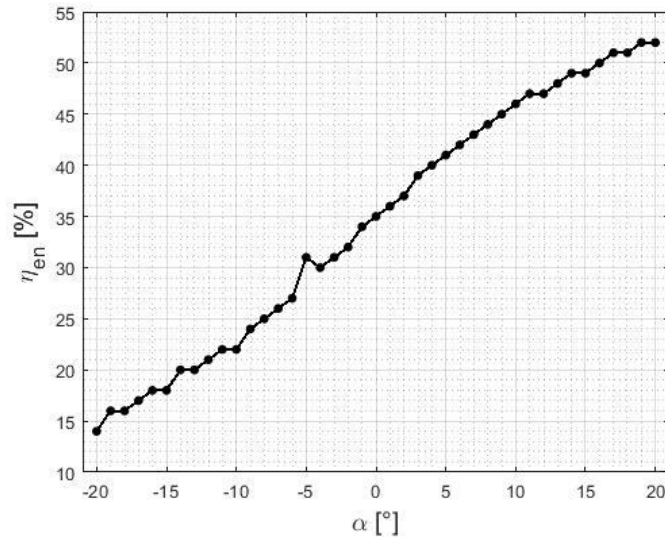
Rys. 5.40. Metoda punktowa (wizualizacja): +20°



Rys. 5.41. Metoda punktowa (luminancje): +20°

Tablica 5.4. Zestawienie wyników obliczeń nowych parametrów oceny efektywności energetycznej i zanieczyszczenia światłem dla iluminacji Białego Domku metodą punktową w przykładzie obliczeniowym 1

α	η_{il}	ww_{il}	η_{en}	L_u	L_p
[°]	[%]	[%]	[%]	$\left[\frac{cd}{m^2}\right]$	[-]
-20	18	23	14	12,7	1,1
-19	20	25	16	13,8	1,2
-18	21	26	16	14,4	1,2
-17	22	28	17	15,0	1,3
-16	23	29	18	15,7	1,3
-15	23	29	18	15,7	1,3
-14	25	32	20	17,3	1,4
-13	26	33	20	17,9	1,5
-12	27	34	21	18,8	1,6
-11	28	35	22	19,3	1,6
-10	29	36	22	19,9	1,7
-9	31	39	24	21,3	1,8
-8	32	41	25	22,3	1,9
-7	34	43	26	23,3	1,9
-6	35	45	27	24,3	2,0
-5	39	49	31	27,0	2,3
-4	38	49	30	26,5	2,2
-3	40	51	31	27,6	2,3
-2	41	53	32	28,7	2,4
-1	43	55	34	29,8	2,5
+0	44	56	35	30,6	2,5
+1	46	59	36	32,0	2,7
+2	48	61	37	33,1	2,8
+3	49	63	39	34,2	2,8
+4	51	64	40	35,2	2,9
+5	52	66	41	35,9	3,0
+6	53	68	42	37,1	3,1
+7	55	69	43	37,9	3,2
+8	56	71	44	38,7	3,2
+9	57	73	45	39,6	3,3
+10	58	74	46	40,3	3,4
+11	59	75	47	41,1	3,4
+12	60	77	47	41,8	3,5
+13	61	78	48	42,5	3,5
+14	62	79	49	43,1	3,6
+15	63	80	49	43,7	3,6
+16	64	81	50	44,2	3,7
+17	64	82	51	44,8	3,7
+18	65	83	51	45,2	3,8
+19	66	84	52	45,7	3,8
+20	66	85	52	46,2	3,8



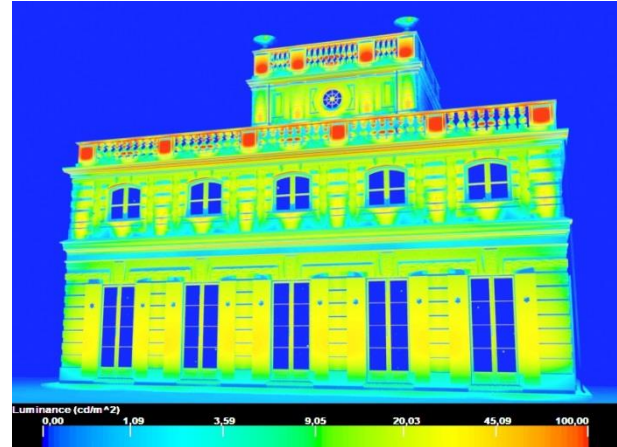
Rys. 5.42. Zależność sprawności energetycznej iluminacji w funkcji kąta wycelowania opraw dla metody punktowej iluminacji Białego Domku w przykładzie obliczeniowym 1

Z analizy wartości zawartych w tabelicy 5.4 wynika, że nowe parametry oceny efektywności energetycznej i zanieczyszczenia światłem są zdecydowanie bardziej wrażliwe na zmiany kąta wycelowania w metodzie punktowej niż odbywało się to w przypadku metody zalewowej. Najniższa wartość sprawności iluminacji została uzyskana dla kąta wycelowania -20° i wynosi 18%, przy wykorzystaniu sprawności na poziomie 23%. Najwyższa dla kąta $+20^\circ$ wynosząca 66%, przy wykorzystaniu sprawności 85%. Oznacza to, że w tym przypadku bardzo mała część strumienia świetlnego pochodzącego ze źródeł światła (15%) nie trafia w iluminowane powierzchnie, co w bezpośrednio przekłada się na zmniejszenie zanieczyszczenia światłem powstającego od tego projektu. Charakterystyka energetycznej sprawności iluminacji jest w tym przypadku bardziej liniowa, niż ta uzyskana dla metody zalewowej, a ewentualna nieliniowość może wynikać z niedokładności przygotowania plików fotometrycznych w pewnych zakresach kątowych (rys. 5.42).

Na uwagę zasługuje również efekt estetyczny, który w tym przypadku nie ulega tak drastycznym zmianom, jak w przypadku metody zalewowej względem małych zmian kąta wycelowania. W wyniku nachylania opraw w kierunku elewacji tworzą się, co prawda coraz większe luminancje (rys. 5.41), jednak może to być w pewnym zakresie dopuszczalne. Uznano, że efekt estetyczny jest w tym przypadku zachowany dla kąta wycelowania $+15^\circ$. Dla tego kąta określono też przewymiarowanie luminacji – rzędu 3,6 raza względem obliczonej i projektowanej średniej luminancji tego projektu iluminacji.



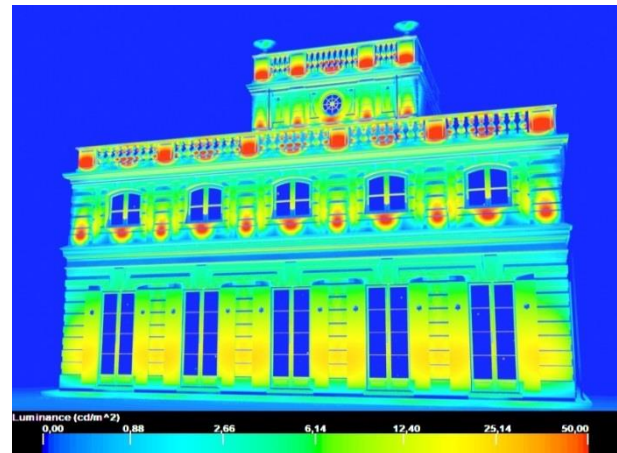
Rys. 5.43. Wizualizacja komputerowa iluminacji Białego Domku dla metody punktowej (rendering wyjściowy)



Rys. 5.44. Rozkład luminancji iluminacji Białego Domku dla metody punktowej (rendering wyjściowy)



Rys. 5.45. Wizualizacja komputerowa iluminacji Białego Domku dla metody punktowej po zmianie wycelowania i redukcji mocy



Rys. 5.46. Rozkład luminancji iluminacji Białego Domku dla metody punktowej po zmianie wycelowania i redukcji mocy

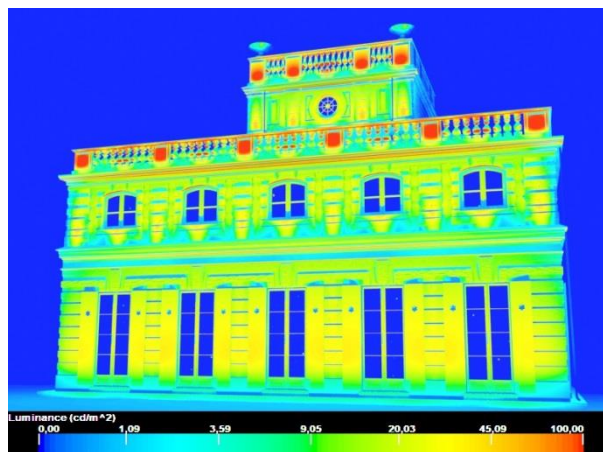
Na rys. 5.43 i 5.44 przedstawiono wizualizację i rozkład luminancja dla pierwotnego wycelowania opraw oświetleniowych. Natomiast rys. 5.45 i 5.46 przedstawiają wizualizację oraz rozkład luminancji uzyskane dla zmiany kąta nachylenia wycelowania opraw oświetleniowych o $+15^\circ$ oraz przy zmniejszeniu mocy opraw (strumienia świetlnego) 3,6 krotnie. Średnia luminancja w tym przypadku jest na poziomie 12 cd/m^2 . Projekt iluminacji Białego Domku metodą punktową został zatem ulepszony zarówno pod względem efektywności energetycznej, jak i zmniejszony został nieco poziom zanieczyszczenia światłem

5.1.3. Przykład symulacyjno – obliczeniowy 2: zmiana bryły fotometrycznej oprawy oświetleniowej

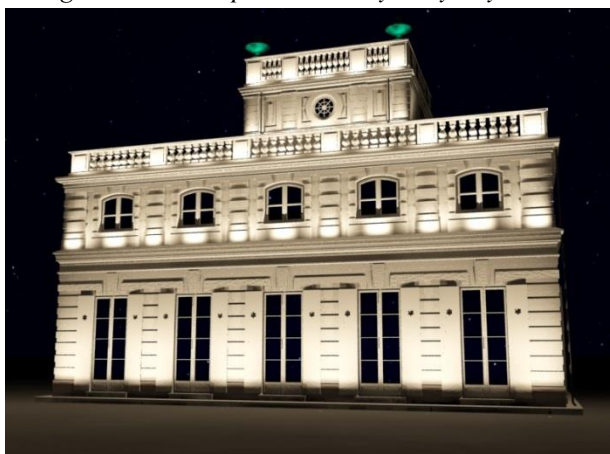
W tym przykładzie analizie poddany zostanie wpływ zmiany bryły fotometrycznej na uzyskane wartości poszczególnych parametrów oceny efektywności energetycznej i zanieczyszczenia światłem. Bryła fotometryczna opraw oświetleniowych (linii świetlnych) zostanie zmieniona z osiowosymetrycznej na asymetryczną, dedykowaną przez producenta do tego typu zadania oświetleniowego. Zmiany w efekcie wizualnym oraz rozkładzie luminancji zostały przedstawione na rys. 4.47 – 4.50. Porównanie uzyskanych wyników obliczeń zawarto w tabelicy 5.5.



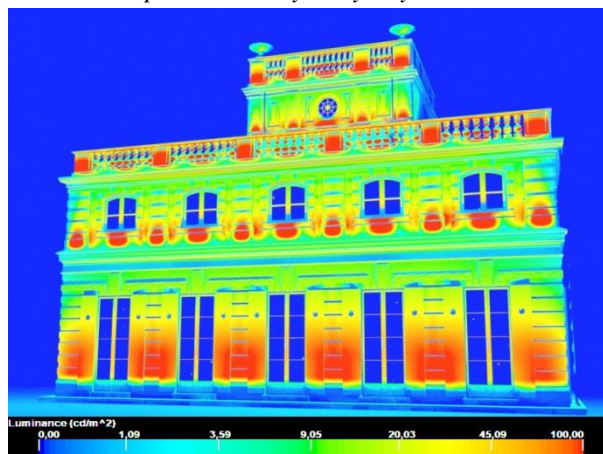
Rys. 5.47. Wizualizacja komputerowa iluminacji Białego Domku dla opraw osiowosymetrycznych



Rys. 5.48. Rozkład luminancji iluminacji Białego Domku dla opraw osiowosymetrycznych



Rys. 5.49. Wizualizacja komputerowa iluminacji Białego Domku dla opraw asymetrycznych



Rys. 5.50. Rozkład luminancji iluminacji Białego Domku dla opraw asymetrycznych

Tablica 5.5. Zestawienie wyników obliczeń nowych parametrów dla iluminacji Białego Domku przy zmianie bryły fotometrycznej opraw oświetleniowych w przykładzie obliczeniowym 2

Obiekt	L_z	$\rho_{\text{śr}}$	S	Oprawy	η_{max}	η_{il}	ww_{il}	η_{en}	L_u	L_p
	$\left[\frac{\text{cd}}{\text{m}^2}\right]$	[-]	$[\text{m}^2]$		[%]	[%]	[%]	[%]	$\left[\frac{\text{cd}}{\text{m}^2}\right]$	[-]
Biały Domek	12	0,60	153	osiowo -symetryczne	79	44	56	35	31	2,6
				asymetryczne	79	56	72	44	39	3,3

Sprawność iluminacji dla oświetlenia oprawami osiowo symetrycznymi kształtuje się na poziomie 44% i wykorzystaniu 56%. Znaczne zwiększenie tych parametrów obserwuje się dla opraw asymetrycznych, odpowiednio 56% i 72%. Oznacza to, że zmiana opraw oświetleniowych na takie o bardziej odpowiedniej bryle jest bardzo opłacalna z punktu widzenia racjonalnego wykorzystania energii oraz przyjazna środowisku pod względem mniejszego generowania zanieczyszczenia światłem. Kwestia doboru opraw, dających jak najlepsze efekty estetyczne oraz ilościowe powinna leżeć w gestii projektanta danej iluminacji, a nie producenta sprzętu oświetleniowego. Jest tak ze względu na mnogość możliwości lokalizacji, wycelowania opraw, które mogą być brane pod uwagę w przypadku iluminacji obiektów architektonicznych.

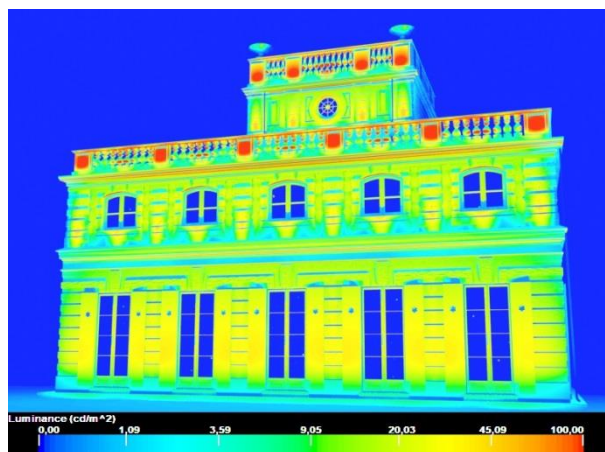
Uwagę zwraca też zdecydowana zmiana efektu estetycznego, spowodowana zwiększeniem poziomu średniej luminancji widocznym już na podstawie analizy uzyskanych rozkładów luminancji (rys. 5.48 i 5.50). Nie jest to jednak zjawisko negatywne. W wyniku lepszego dopasowania bryły fotometrycznej oprawy oświetleniowej do zadania oświetleniowego powstają większe możliwości w redukcji mocy danej instalacji. Tak jest tym przypadku. Wyniki pokazują, że w przypadku iluminacji oprawami osiowosymetrycznymi można zmniejszyć moc opraw (strumień świetlny) 2,6 krotnie, a w przypadku opraw asymetrycznych 3,3 krotnie.

5.1.4. Przykład symulacyjno–obliczeniowy 3: zmiana rozkładu widmowego źródła światła

W rozdziale 3.3 określono, że rozkład widmowy promieniowania źródła światła ma istotny wpływ na uzyskiwany poziom średniej luminancji projektu iluminacji ze względu na widmowy rozkład współczynnika odbicia danego materiału elewacji. Postanowiono, zatem sprawdzić w jakim stopniu wpływa to na efektywność energetyczną, zanieczyszczenie światłem oraz efekt estetyczny dla wybranego obiektu iluminacji. W związku z tym wykonano wizualizację oraz rozkład luminancji dla przypadku iluminacji Białego Domku metodą punktową przy zastosowaniu źródeł światła o temperaturze barowej 4000K oraz 2700K. Uzyskane obrazy przedstawiają rysunki 5.51 – 5.54. Natomiast wyniki obliczeń zawarto w tabelicy 5.6.



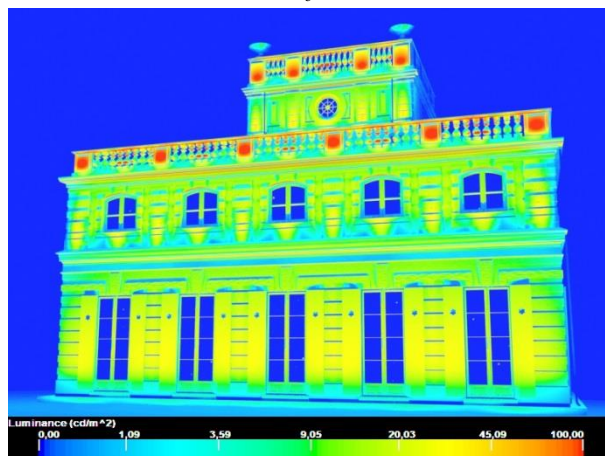
Rys. 5.51. Wizualizacja komputerowa iluminacji Białego Domku dla źródeł światła $T_c=4000K$



Rys. 5.52. Rozkład luminancji iluminacji Białego Domku dla źródeł światła $T_c=4000K$



Rys. 5.53. Wizualizacja komputerowa iluminacji Białego Domku dla źródeł światła $T_c=2700K$



Rys. 5.54. Rozkład luminancji iluminacji Białego Domku dla źródeł światła $T_c=2700K$

Tablica 5.6. Zestawienie wyników obliczeń nowych parametrów oceny efektywności energetycznej i zanieczyszczenia światłem dla iluminacji Białego Domku przy zmianie rozkładu widmowego (temperatury barwowej) źródeł światła w przykładzie obliczeniowym 3

Obiekt	L_z	ρ_{sr}	S	T_c	η_{max}	η_{il}	ww_{il}	η_{en}	L_u	L_p
	$\frac{cd}{m^2}$	[-]	$[m^2]$	[K]	[%]	[%]	[%]	[%]	$\frac{cd}{m^2}$	[-]
Biały Domek	12	0,60	153	4000	79	44	56	35	31	2,6
		0,72*		2700	78	44	56	34	30	2,5

*wartość założona

Ze względu na brak dostępu do informacji na temat cech materiału elewacji Białego Domku (w wyniku remontu obiektu), założono że zmiany w całkowitym współczynniku odbicia dla różnych źródeł światła odbicia są takie same, jak w przypadku białej cegły z rozdziału 3.3. Współczynnik odbicia dla źródeł LED 2700K stanowi zatem 120% wartości współczynnika odbicia dla źródeł LED 4000K. Przy takim założeniu wykonano obliczenia nowych parametrów, średniej luminancji oraz jej przewymiarowania. Co więcej zastosowane w obu przypadkach oprawy stanowią to samo rozwiązanie konstrukcyjne, tego samego producenta (taka sama bryła i sprawność) – jedyna różnica polega na innej temperaturze barwowej.

Jak powszechnie wiadomo, strumień świetlny źródła LED jest zależny od rozkładu widmowego (a w efekcie temperatury barwowej) z zależnością: im większa temperatura barwowa tym wyższy strumień świetlny źródła LED. Można by było, więc przypuszczać, że zmiana temperatury barwowej na niższą spowoduje pogorszenie parametrów efektywności energetycznej iluminacji. Jak pokazują uzyskane wyniki obliczeń tak nie jest. Wartości sprawności iluminacji i jej wykorzystania są takie same w obydwu przypadkach, za co odpowiadają te same bryły fotometryczne zastosowanych opraw, ich lokalizacja oraz wycelowanie. Ze względu na różnicę w całkowitych współczynnikach odbicia elewacji dla różnych źródeł światła, uzyskano również bardzo podobny rząd wielkości luminancji średniej ok. 30 cd/m². Oznacza, to że przez odpowiedni dobór barwy światła względem materiału elewacji można uzyskiwać takie same efekty pod względem efektywności energetycznej. Różnica uwidacznia się jednak podczas analizy kwestii zanieczyszczenia światłem. Prace naukowe omówione w rozdziale 1.3, w jednoznaczny sposób stwierdzają, że źródła LED nie są przyjazne środowisku, ze względu na duży udział promieniowania z zakresu niebieskiego w ich rozkładzie widmowych promieniowania. Mając to na uwadze, a także fakt, że źródło LED o niższej temperaturze barwowej posiada znacznie mniej światła

niebieskiego (niż w przypadku źródeł LED o temperaturach wyższych), należy stwierdzić, że w przypadku iluminacji Białego Domku, zdecydowanie bardziej przyjazna środowisku jest iluminacja wykorzystująca źródła LED 2700K. W tej sytuacji, należy jednak jeszcze przeanalizować uzyskany efekt estetyczny. Wydaje się, że temperatura barwowa 2700K jest zdecydowanie bardziej odpowiednia dla potrzeb iluminacji tego obiektu poprzez nadanie mu większej plastyczności i większych kontrastów pomiędzy cieniowaniem elementów elewacji (rys. 5.53). Jest to jednak stwierdzenie czysto subiektywne i nie może być traktowane jako imperatyw w projektowaniu iluminacji różnych obiektów. Tym nie mniej, z punktu widzenia kwestii zanieczyszczania światłem iluminacja Białego Domku oprawami LED 2700K jest zdecydowanie bardziej pożądana.

5.2. Podsumowanie przykładów obliczeniowych.

Zaprezentowane przykłady obliczeniowe udowadniają, że możliwe jest kontrolowanie zarówno efektywności energetycznej w iluminacji obiektów, jak i wpływanie w jakim stopniu dany projekt zanieczyszcza środowisko światłem. W celu podkreślenia wagi wpływu zaprezentowanych metod na poprawę efektu energetycznego oraz zmniejszenie zanieczyszczenia światłem, postanowiono przedstawić zestawienie najbardziej istotnych danych łącznie z pewnym aspektem ekonomicznym (tablica 5.7).

Tablica 5.7. Wyniki analizy ekonomicznej i środowiskowej metod ulepszania projektu iluminacji na przykładzie Białego Domku.

Wariant iluminacji	α	Rodzaj opraw	T_c	P_0	L_u	ϕ_{nu}	E_0^{**}	Koszt rocznej eksploatacji***
	[°]		[K]	[kW]	$\left[\frac{cd}{m^2}\right]$	[lm]	[kWh]	[zł]
Metoda zalewowa	0°	obrotowo –symetryczne	4000	0,62	23	33 940	2480	1364,00
	+10°*	obrotowo –symetryczne	4000	0,33	12	13 104	1320	726,00
Metoda punktowa	0°	osiowo –symetryczne	4000	0,78	31	19 247	3120	1716,00
	0°	asymetryczne	4000	0,78	39	12 397	3120	1716,00
	+15°*	osiowo –symetryczne	4000	0,30	12	8720	1200	660,00
	0°	osiowo –symetryczne	2700	0,78	30	15 679	3120	1716,00

* po odpowiedniej redukcji mocy opraw

**dla czasu eksploatacji 4000h (założenie)

** dla średniej stawki za kilowatogodzinę z 2018 roku: 0,55 zł / kWh [123]

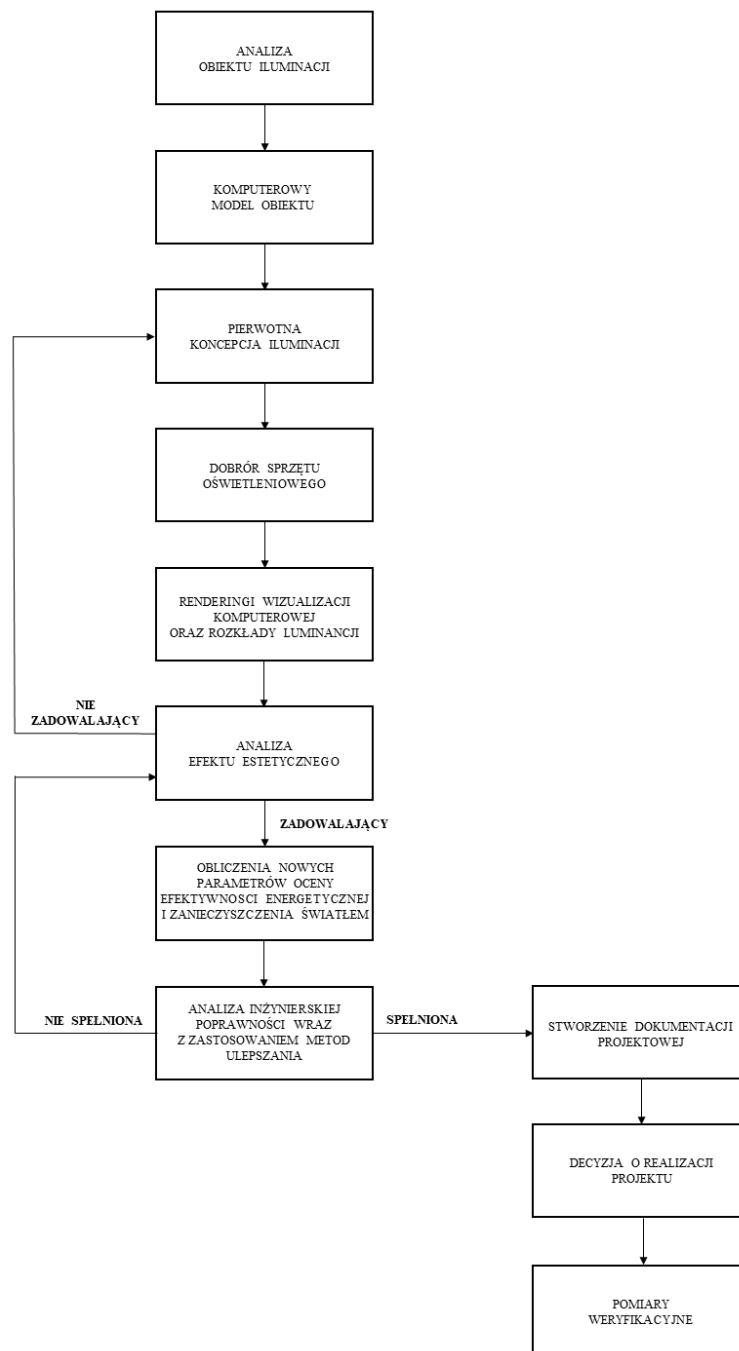
Na podstawie wyników z tablicy 5.7 widać, że również koszty eksploatacji instalacji iluminacyjnej mogą zostać ograniczone w znacznym stopniu. Różnica zużywanego energii dla metody zalewowej przy wycelowaniu 0° i +10° wynosi 1160 kWh. Natomiast dla metody punktowej przy wycelowaniu 0° i +15°, 1920kWh. Generuje to oszczędności rzędu 600–1000 zł w skali roku. Zastosowanie systemu sterowania (ściemnienia opraw oświetleniowych) pojawia się jeszcze jeden pozytywny aspekt takiego rozwiązania związany z kwestią systemu konserwacji w iluminacji obiektów. Wysterowanie opraw na poziom niższy niż znamionowy daje możliwość późniejszego podniesienia poziomu luminacji w przypadku spadku

strumienia świetlnego źródła światła względem jego charakterystyki spadku strumienia świetlnego w czasie.

W przypadku zmiany brył fotometrycznych opraw oświetleniowych lub temperatury barwowej źródeł światła na niższą, koszty eksploatacyjne pozostają bez zmian, jednak zanieczyszczenie światłem powstające od danej instalacji iluminacyjnej jest niższe o ok. 20 – 35% (określone na podstawie wartości strumienia nieużytecznego z tablicy 5.7). Jest to efekt bardzo pożądany. Trzeba mieć jednak na uwadze, że wskazanie poziomy oszczędności i poprawy efektywności energetycznej oraz zanieczyszczenia światłem mogą się różnić w zależności od wielu czynników, takich jak: dobór opraw, odległość od obiektu oraz poziom luminancji średniej, na jaką jest projektowana iluminacja. Tym nie mniej indywidualna analiza każdego przypadku uwzględniająca omówione w tym rozdziale czynniki łącznie może dawać bardzo wymierne, pozytywne korzyści. Poprzez świadome zastosowanie odpowiedniej metody (lub metod) ulepszania projektu iluminacji i analizę uzyskanego efektu estetycznego można zatem uzyskać rozwiązanie bardziej wydajne energetycznie, generujące mniejsze zanieczyszczenie światłem oraz niższe koszty eksploatacyjne.

6. ALGORYTM PROJEKTOWANIA ILUMINACJI PRZY WYKORZYSTANIU NOWYCH PARAMETRÓW OCENY.

Analiza zawarta w rozdziałach 5 i 6 oraz wnioski z niej płynące posłużyły do stworzenia propozycji systemu ilościowej oceny przystosowanego dla potrzeb iluminacji obiektów. Powstały system uwzględnia zarówno efektywność energetyczną, zanieczyszczenie światłem, jak również kładzie duży nacisk na analizę powstałego efektu estetycznego. Na rys. 6.1 został przedstawiony algorytm systemu oceny. Jego poszczególne elementy systemu zostaną pokrótce omówione poniżej.



Rys. 6.1. Schemat blokowy proponowanego systemu oceny ilościowej w iluminacji obiektów

Algorytm systemu oceny bazuje na projektowaniu iluminacji za pomocą wizualizacji komputerowej. Składa się z 11 etapów, przy czym nie wszystkie muszą być konieczne zrealizowanie, zgodnie z ideą algorytmu z rys. 3.20.

1) ANALIZA OBIEKTU ILUMINACJI:

Wstępny etap mający na celu ustalenie: dokładnej geometrii obiektu oraz jego położenia, stylu architektonicznego, głównych kierunków obserwacji, wytycznych konserwatora zabytków, jeżeli obiekt znajduje się pod taką ochroną.

2) PIERWOTNA KONCEPCJA ILUMINACJI:

Etap wynikający z analizy dokonanej w poprzednim kroku. Ustala się w nim metodę iluminacji (punktową, zalewową, warstwową) oraz opisuje zakładany efekt estetyczny.

3) KOMPUTEROWY MODEL OBIEKTU:

Następuje tu modelowanie geometrii obiektu w graficznym programie komputerowym. Tworzone są również takie istotne czynniki poprawnego modelu, jak modelowanie materiałów elewacji oraz światła podkładowego (otoczenia).

4) DOBÓR SPRZĘTU OŚWIETLENOWEGO:

Etap odnosi się do ustalenia parametrów opraw oświetleniowych, dzięki którym możliwa do realizacji jest pierwotna koncepcja iluminacji. Określa się również dostępność sprzętu oświetleniowego oraz nakłady finansowe potrzebne do zrealizowania projektu.

5) RENDERINGI WIZUALIZACJI KOMPUTEROWEJ I ROZKŁADÓW LUMINANCJI:

Następuje to rozmieszczenie sprzętu oświetleniowego oraz stworzenie z wystarczającą dokładnością renderingów wizualizacji komputerowej, a także uzyskanych rozkładów luminancji.

6) ANALIZA EFEKTU ESTETYCZNEGO:

W tym etapie następuje odpowiedź na pytanie: czy uzyskany efekt estetyczny jest zadowalający? Jeżeli efekt nie jest spełniony następuje powrót do etapu 4. Jeżeli efekt estetyczny jest spełniony przechodzi się do etapu 7.

7) OBLICZENIA NOWYCH PARAMETRÓW OCENY EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ I ZANIECZYSZCZENIA ŚWIATŁEM:

Wykonanie obliczeń parametrów: luminancji średniej, sprawności iluminacji, maksymalnej sprawności iluminacji, wskaźnika wykorzystania sprawności iluminacji oraz sprawności energetycznej iluminacji.

8) ANALIZA INŻYNIERSKIEJ POPRAWNOŚCI WRAZ ZASTOSOWANIE METOD ULEPSZANIA:

Określenie, czy uzyskany efekt ilościowy możliwy do przeanalizowania na podstawie parametrów oceny efektywności energetycznej i zanieczyszczenia światłem, obliczonych w poprzednim kroku, jest akceptowalny.

Jeżeli tak, można przystąpić do etapu 10. Jednak tuż przed nim należy podjąć decyzję na podstawie uzyskanej wartości przewymiarowania luminancji, o zastosowaniu odpowiedniego systemu sterowania lub zmianie opraw oświetleniowych na takie o odpowiedniej mocy (strumieniu świetlnym), takich samych bryłach fotometrycznych oraz temperaturach barwowych.

Jeżeli okazało się, że ilościowa analiza wykazała pewne braki i niedociągnięcia np. uzyskana wartość sprawności iluminacji, jak również wskaźnik wykorzystania sprawności iluminacji są na bardzo niskim poziomie, należy zadbać o ich poprawę w wyniku zastosowania jednej z metod ulepszania projektu:

- a) zmianę wycelowania opraw oświetleniowych,
- b) zmianę brył fotometrycznych opraw oświetleniowych,
- c) zmianę rozkładu widmowego źródła światła,
- d) zmianę sprawności opraw oświetleniowych,
- e) w skrajnych przypadkach: zmianę metody iluminacji lub koncepcji iluminacji (co powoduje powrót do etapu 2).

Po zastosowaniu metod ulepszania projektu pod względem efektywności energetycznej oraz zanieczyszczenia światłem następuje powrót do 6 (analiza efekty estetycznego).

9) STWORZENIE DOKUMENTACJI PROJEKTOWEJ:

Następuje tutaj stworzenie dokładnej dokumentacji technicznej projektu, tak aby projekt mógł być z dużą dokładnością możliwy do realizacji w rzeczywistości. Uznaje się, że dokładna dokumentacja techniczna powinna zawierać:

- informacje podstawowe obiekcie: o głównych kierunkach obserwacji, koncepcji i metodzie iluminacji,
- renderingi wizualizacji komputerowej i rozkładów luminancji,
- uzyskane wartości poszczególnych parametrów ilościowej oceny,
- wszystkie dane charakterystyczne sprzętu oświetleniowego, zwłaszcza z zakresu wielkości fotometrycznych oraz kolorymetrycznych,
- rozmieszczenie sprzętu oświetleniowego z podaniem odległości montażowych oraz kątów wycelowania.

10) DECYZJA O REALIZACJI PROJEKTU:

Praktyka projektowa pokazuje, że wiele projektów jest przygotowywanych jednak tylko nieznaczna część z nich jest realizowana. Na tym etapie następuje ostateczna decyzja o realizacji projektu (jest ona po stronie inwestora). W przypadku pozytywnej decyzji przystępuje się do zamówienia sprzętu oświetleniowego oraz jego montażu zgodnie z wytycznymi zawartymi w dokumentacji projektowej.

11) POMIARY WERYFIKACYJNE:

Po wykonaniu instalacji iluminacyjnej i montażu sprzętu, możliwe jest przeprowadzenie pomiarów służących weryfikacji projektu pod względem ilościowym – związanych z tym parametrów oceny efektywności energetycznej i zanieczyszczenia światłem. Głównym pomiarem jest pomiar rozkładu luminancji obiektu, a w efekcie sprawności iluminacji i parametrów pokrewnych.

UWAGI KOŃCOWE:

Zaproponowany algorytm systemu oceny wydaje się być prosty w aplikacji. Jego główną zaletą jest możliwość zadbania o jak najlepsze wykorzystanie energii elektrycznej w projekcie iluminacji oraz znaczną redukcję zanieczyszczenia światłem.

7. PODSUMOWANIE

7.1. Konkluzja

Głównym powodem podjęcia przez Autora tematyki niniejszej dysertacji było zainteresowanie obszarem iluminacji obiektów już od początku jego studiów inżynierskich na specjalności związanej z techniką świetlną na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej. Zgłębianie tematu odbywało się w sposób stopniowy. Najpierw przez naukę programów do projektowania oraz zwiększanie doświadczeń poprzez wykonywanie kolejnych projektów iluminacji. W podejmowanych poczynaniach projektowych, Autor zaobserwował niedostatek związany z kryteriami projektowymi a także brak określania efektywności energetycznej w iluminacji obiektów, jak również oceny czy dane rozwiązanie jest dobre lub nie, ze względu na problem zanieczyszczenia światłem środowiska. Zaobserwowana potrzeba opracowania pewnych narzędzi oraz metod oceny ilościowej w obszarze iluminacji przy jednoczesnej kontroli uzyskiwanego efektu estetycznego stanowi główny cel podjętej rozprawy doktorskiej.

W pierwszej części pracy (rozdział 1) został dokonany przegląd literatury względem podzielonych tematycznie zagadnień związanych z tematem pracy. Pierwszą grupę z nich stanowi iluminacja obiektów. Dokładnie opisano korzenie tego zagadnienia sięgające początków XIX w. Omówiono i skomentowano sposoby projektowania iluminacji. Nawiązano również do głównych cech podstawowych metod iluminacji (metody zalewowej oraz punktowej). Druga grupa zagadnień odnosi się do kwestii efektywności energetycznej. Przedstawiono tutaj dane statystyczne określające zużycie energii elektrycznej na potrzeby oświetleniowe w ostatnich latach oraz obecnie obowiązujące trendy związane z audytem i modernizacją oświetlenia. Sprawdzony został również stan nauki w tym obszarze, realizowany przez naukowców z całego świata i przytoczone stosowne pozycje literaturowe. Trzecią grupę zagadnień stanowił popularny ostatni problem zanieczyszczenia środowiska światłem. Określono istotę i poziom interdyscyplinarności tego problemu, poprzez zwrócenie uwagi na jego wpływ na organizmy żywe, jego pomiary oraz modelowanie, a także politykę państw względem niego. Studia literaturowe w tych trzech grupach zagadnień spowodowały utwierdzenie w przekonaniu, że zarówno efektywność energetyczna, jak i zanieczyszczenie światłem są w bardzo istotny sposób związane z iluminacją obiektów. Ponadto podkreślony został również problem braku narzędzi służących analizie tych zagadnień w przypadku

projektowania iluminacji, co zaowocowało dostrzeżeniem istotnych problemów naukowych oraz sformułowaniu tez niniejszej pracy (rozdział 2).

W trzecim rozdziale, zaprezentowano nowy parametr oceny – sprawność iluminacji, a także jego parametry pokrewne: maksymalną sprawność iluminacji, wskaźnik wykorzystania sprawności iluminacji oraz energetyczną sprawność iluminacji. Przedstawiono również wstępną analizę przydatności stworzonych parametrów do oceny projektu iluminacji pod względem zanieczyszczenia światłem i efektywności energetycznej. Analiza została oparta o symulacyjne przykłady obliczeniowe dla najprostszych sytuacji oświetlonych (pojedynczych opraw) a także o pomiary nowych parametrów w praktyce dla zrealizowanych już projektów iluminacji. Ponadto, zaprezentowano metody obliczeń nowych parametrów i określono ich przydatność łącznie z niezbędnymi założeniami i źródłami błędów. Udowodniono zbieżność metod i wytypowano tę najbardziej użyteczną (Metodę Prostopadłościanu) ze względu na kwestie projektowe. Na koniec rozdziału omówiono sposób wyznaczania średniej luminacji projektu iluminacji.

Rozdział czwarty położył nacisk na zbadanie działania systemu oceny w praktyce dla złożonych projektów iluminacji. Wykonano pięć profesjonalnych projektów iluminacji w ujęciu wariantowych (utożsamiających dwie metody iluminacji zalewową i punktową) w odniesieniu do podziału architektury ze względu na geometrię. Dla każdego z projektów powstała szczegółowa dokumentacja techniczna: wizualizacje, rozkłady luminancji, zestawienia zastosowanego sprzętu oświetleniowego oraz jego rozmieszczenie. Następnie wykonano dla rozważanych obiektów obliczenia nowych parametrów oceny efektywności energetycznej i zanieczyszczenia światłem, a uzyskane wyniki dokładnie skomentowano. Ustalono, że ocena bazująca na nowych parametrach i systemie oceny jest jak najbardziej możliwa i łatwa w aplikacji na poziomie projektowym. Uzyskane wyniki pokazały, że uzyskiwane wartości sprawności iluminacji oraz pozostałych parametrów są niewielkie. Świadczy to o tym, że zadowalający efekt estetyczny nie zawsze musi być związany (i najczęściej nie jest) z racjonalnym przetwarzaniem energii elektrycznej w rozwiązaniach iluminacyjnych. Stworzyło to również obszar pod dalszą analizę metod ulepszania projektu pod względem efektywności energetycznej, a przy okazji redukcji zanieczyszczenia światłem powstającego od projektu iluminacji.

Rozdział piąty zawiera analizę możliwości ulepszania projektu iluminacji pod względem efektywności energetycznej i redukcji zanieczyszczenia światłem. Zaprezentowano czynnik najbardziej wpływający na te kwestie a także wykazano, na podstawie trzech przykładów symulacyjno-obliczeniowych, w jakim stopniu możliwa jest ich kontrola.

Wnioskiem płynącym z tej części pracy jest stwierdzenie, że całościowa analiza rozwiązań oświetleniowych w danym projekcie iluminacji, uwzględniająca wszystkie czynniki, a także nowe parametry oceny daje najlepsze efekty pod względem ulepszenia efektywności energetycznej projektu iluminacji i redukcję zanieczyszczenia światłem od niego powstałego. Dodatkowo, nastąpiła tu pośrednio odpowiedź na pytanie: czy projekt iluminacji może w żaden sposób nie wpływać na zanieczyszczenie światłem. Jest to niemożliwe ze względu na odbicia strumienia świetlnego od głównych powierzchni oświetlanego obiektu. Jednak świadome projektowanie iluminacji obiektu, poparte zarówno analizą uzyskanego efektu estetycznego, jak i ilościową w postaci nowych parametrów pozwala przy zastosowaniu pewnych dobrych praktyk projektowych (metody redukcji) na znaczne ograniczenie niepożądanego promieniowania bezpośrednio w niebo.

W rozdziale siódmym nastąpiło swoiste podsumowanie badań i analiz wykonanych w rozdziałach 5 i 6. Przedstawiono tutaj algorytm systemu ilościowej oceny w iluminacji obiektów, którego głównym celem jest bardziej świadome projektowanie iluminacji pod względem efektywności energetycznej i zanieczyszczenia światłem. Poszczególne etapy algorytmu zostały wnikliwie skomentowane, co na pewno ułatwi jego stosowanie w praktyce projektowej.

7.2. Dowody założonych tez

Niniejsza rozprawa doktorska opiera się na dwóch tezach. Pierwsza mówi o tym, że:

Istnieje możliwość oceny oraz ilościowej kontroli efektywności energetycznej i zanieczyszczenia środowiska światłem w iluminacji obiektów.

W rozdziale trzecim przedstawiono definicje nowych parametrów ilościowej oceny stworzone dla potrzeb iluminacji obiektów. Są to sprawność iluminacji, maksymalna sprawność iluminacji, wskaźnik wykorzystania sprawności iluminacji, energetyczna sprawność iluminacji, luminancja uzyskana i przewymiarowanie luminancji. W toku pracy przedstawiono metody obliczeń nowych parametrów łącznie z odpowiednimi założeniami i analizą ich dokładności. Wykonano również obliczenia dla prostych przypadków iluminacji (rozdział 3) oraz zaprezentowano aplikację do złożonych projektów iluminacji, co w jednoznaczny sposób potwierdziło przydatność i poprawność nowych parametrów oceny. Zatem, z argumentacji przedstawionej powyżej wynika, że **pierwsza teza** niniejszej dysertacji została **pomyślnie udowodniona**.

Treść drugiej tezy pracy jest następująca:

Istnieje możliwość ulepszenia efektywności energetycznej projektu iluminacji i redukcji zanieczyszczenia światłem od niego powstałego bez konieczności wprowadzania istotnych zmian efektu estetycznego.

W rozdziale czwartym w wariantowym ujęciu wykonano również obliczenia nowych parametrów i zauważono duży potencjał w możliwościach poprawy projektu zarówno pod względem efektywności energetycznej, jak i zanieczyszczenia światłem. W piątym rozdziale dokonano analizy czynników wpływających w istotny sposób na kwestie wymienione powyżej. Wykonano szereg przykładowych symulacji i obliczeń uwzględniających określone wcześniej czynniki. Analizie poddawane były zarówno uzyskane wyniki obliczeń nowych parametrów, jak i efekty estetyczne w postaci wizualizacji komputerowych i rozkładów luminancji. W rezultacie uzyskano rozwiązania o ulepszonym wykorzystaniu energii i zredukowanym zanieczyszczeniu światłem przy jednoczesnym braku istotnych zmian z zakładanym, pierwotnym efekcie estetycznym. Zostało to podsumowane w szóstym rozdziale pracy w postaci schematu blokowego algorytmu systemu oceny możliwego do aplikacji w proces projektowania iluminacji. Dzięki temu, można jednoznacznie stwierdzić, że **druga teza** niniejszej dysertacji została **pomyślnie udowodniona**.

7.3. Osiągnięcia własne

W toku badań związanych z przygotowaniem dysertacji w ramach studiów doktoranckich, Autor zmierzył się z szeregiem problemów technicznych, naukowych a nawet dydaktycznych. Najważniejsze osiągnięcia własne podzielono na osiągnięcia twórcze, odpowiadające za rozwiązanie problemu naukowego i na osiągnięcia warsztatowe, które świadczą o udoskonaleniu warsztatu badawczego Autora.

OSIĄGNIĘCIA TWÓRCZE:

- ✓ zdefiniowania nowych parametrów inżynierskiej oceny iluminacji obiektu,
- ✓ opracowanie dwóch nowych metod obliczeniowych parametru sprawności iluminacji bazujących na analizie rozkładu natężenia oświetlenia na poszczególnych płaszczyznach obliczeniowych oraz określenie ich dokładności i źródeł błędów,
- ✓ opracowanie analitycznego sposobu określenia średniej wartości luminancji dla danego projektu iluminacji,
- ✓ wykonanie sześciu profesjonalnych projektów iluminacji różnych obiektów architektonicznych (łącznie kilkanaście wariantów w postaci wizualizacji komputerowych oraz rozkładów luminancji w skali pseudokolorów),
- ✓ stworzenie prostego w implementacji systemu oceny ilościowej w iluminacji obiektów pod względem energetycznym i zanieczyszczenia światłem.

OSIĄGNIĘCIA WARSZTATOWE:

- ✓ poszerzenie wiedzy z zakresu techniki świetlnej, pomiarów i projektowania oświetlania przy wykorzystaniu specjalistycznych przyrządów i oprogramowania,
- ✓ poszerzenie wiedzy z zakresu zanieczyszczenia światłem środowiska oraz metod jego ograniczenia i pomiarów,
- ✓ określenie aspektów na jakie należy zwracać uwagę przy pomiarze parametru sprawności iluminacji, tak aby pomiar został wykonany z odpowiednio dużą, wystarczającą dokładnością,
- ✓ udoskonalenie umiejętności pracy na stanowisku badawczym: przygotowanie i opublikowanie 8 publikacji naukowych (2 publikacje w czasopismach listy A, 2 publikacje w bazie IEEE i WoS oraz 4 publikacje w czasopismach listy B),
- ✓ udoskonalenie umiejętności interpersonalnych uzyskane na podstawie udziału w 13 konferencjach naukowych (3 prezentacje plakatowe oraz 10 prezentacji ustnych) o zasięgu krajowym i międzynarodowym (m.in. Czechy, Węgry, Słowenia, USA).

7.4. Wnioski końcowe

- ✓ Zanieczyszczenie światłem środowiska jest aktualnie istotnym zagadnieniem dającym wiele możliwości do rozwoju badań naukowych. Jest to problem interdyscyplinarny i jak pokazano w niniejszej pracy, nie do końca zbadany jak choćby w kwestii jego ograniczenia w przypadku iluminacji obiektów.
- ✓ Efektywność energetyczna jest problemem rozwojowym, podlegającym ciągłemu poszerzaniu o nowe niezbadane obszary. Iluminacja obiektów, dla której nie było do tej pory prowadzonej analizy efektywnego wykorzystania energii, stanowi idealny przykład potwierdzający głęboki sens powyższego stwierdzenia.
- ✓ Poprzez wykorzystanie odpowiedniej metody obliczeń, głównie Metody Prostopadłościanu (Sześcianu), można z powodzeniem i dużą dokładnością obliczyć strumień świetlny użyteczny oraz nieużyteczny dla danego rozwiązania iluminacyjnego, dające wiele informacji o racjonalności wykonania samego projektu.
- ✓ Dokładność obliczeń nowych parametrów oceny efektywności energetycznej i zanieczyszczenia światłem projektu iluminacji jest związana z wielkością i dyskretyzacją płaszczyzn obliczeniowych w Metodzie Prostopadłościanu (Sześcianu). W toku wykonywania obliczeń należy zadbać o to, aby płaszczyzny były dostatecznie duże, a dyskretyzacja wystarczająco gęsta względem danego rozwiązania oświetleniowego i lokalizacji opraw.
- ✓ Nowe parametry oceny zanieczyszczenia światłem: sprawność iluminacji, maksymalna sprawność iluminacji, wskaźnik wykorzystania sprawności iluminacji oraz energetyczna sprawność iluminacji, luminancja uzyskana i przewymiarowanie luminancji powinny być analizowane razem. Każdy z nich wnosi do projektu nową przestrzeń i wymiar mówiący o jakości sprzętu oświetleniowego, kwestii zanieczyszczenia światłem, efektywności energetycznej danego rozwiązania czy też kwestie inżynierskiej poprawności wykonania samego projektu.
- ✓ Ocena ilościowa projektu iluminacji bazująca na nowych parametrach oceny powinna być wykonywana łącznie z analizą efektu estetycznego, przy czym ten ostatni powinien być nadrzędny względem uzyskanych wyników obliczeń nowych parametrów oceny.
- ✓ Na podstawie dalszych analiz w obszarze efektywności energetycznej i zanieczyszczenia światłem w iluminacji obiektów, dających zupełnie nową świadomość projektową, powinny powstać pewne wytyczne projektowe

(raport techniczny) umożliwiające tworzenie projektów iluminacji przyjaznych środowisku czy to pod względem racjonalnego zużycia energii elektrycznej, czy ochrony nocnego nieboskłonu przed zbytnim rozjaśnieniem.

7.5. Perspektywa kontynuacji prac badawczych w opisywanym obszarze

Na podstawie przedstawionych w pracy nowej metody oceny efektywności energetycznej i zanieczyszczenia światłem zaproponowanej dla potrzeb iluminacji obiektów, widać pewne niedoskonałości, które można by było wyeliminować podczas dalszego rozwoju badań tego zagadnienia. Można przewidywać zatem, następujące kierunki rozwoju opisanych badań:

- a) Stworzenie oprogramowania komputerowego związanego z analizą obrazów, które umożliwiłoby określenie wartości poszczególnych parametrów oceny (w tym średniej luminacji) z uzyskanego renderingu rozkładu luminancji danej koncepcji iluminacji (w skali pseudokolorów). Tego typu oprogramowanie w zdecydowany sposób usprawniłoby obliczenia poszczególnych parametrów.
- b) Stworzenie oprogramowania komputerowego, które z dużą dokładnością i poprawnością umożliwiłoby przeprowadzanie ilościowej analizy kolorymetrycznej w iluminacji obiektów. Odbywała by się ona na podstawie rzeczywistych rozkładów widmowych zastosowanych źródeł światła (oraz parametrów pokrewnych – np. temperatury barowej) oraz widmowych rozkładów współczynnika odbicia zastosowanych materiałów. Tego typu oprogramowanie na pewno poprawiło by zarówno dokładność, jak i wygodę obliczeń poszczególnych parametrów oceny
- c) Przeprowadzenie obliczeń nowych parametrów dla większej liczby obiektów referencyjnych w ujęciu wielowariantowym, tak aby można było przygotować zakresy ich wartości. Mogłoby to zostać zaimplementowane do kryteriów projektowych iluminacji obiektów i stworzenia szczegółowego raportu technicznego lub nawet normy projektowej związanej z tego typu oświetleniem (po zainteresowaniu tą tematyką odpowiednich struktur oświetleniowych naukowców i inżynierów).
- d) Konstrukcja układu optycznego, który we współpracy z jednym źródłem światła o dużym strumieniu świetlnym, umożliwiłby realizację iluminacji danego obiektu

z dystansu (zarówno metodą zalewową, jak i punktową) o dobrych parametrach efektywności energetycznej oraz zanieczyszczenia światła. Da się to co prawda zrobić już obecnie za pomocą projektora multimedialnego, jednak towarzyszy temu niewielka sprawność iluminacji, a niska trwałość źródeł światła stosowanych w tych projektorach stawia pod znakiem zapytania racjonalność stosowania takiego rozwiązania.

8. LITERATURA

- [1] Żagan W., Krupiński R., Teoria i praktyka iluminacji obiektów, OWPW, Warszawa, 2016, ISBN 978–83–7814–550–9
- [2] Krupiński R., Visualization as alternative to tests on lighting under real conditions, *Light & Engineering* Vol. 23, No. 4, pp. 22–29, 2017, ISSN 0236–2945
- [3] Żagan W., Iluminacja obiektów, OWPW, Warszawa, 2003, ISBN 83–7207–360–0
- [4] Kaźmierczak P., Badania eksploatacyjne stanu oświetlenia obiektów iluminowanych, rozprawa doktorska, Wydział Elektryczny, Politechnika Warszawska, 2006
- [5] Pawlaczyk M., Ekwiwalentność kontrastu barwy i luminancji w iluminacji, rozprawa doktorska, Wydział Elektryczny, Politechnika Warszawska, 2011
- [6] Żagan W., Opinion: The use of color light for floodlighting, *Lighting Research & Technology* 2015, vol 47, pp. 763, ISSN 1477–1535
- [7] Skarżyński K., Żagan W., Analysis of light pollution from floodlighting– is there a different approach to floodlighting?, *Light & Engineering* 2017, no. 25. no.1, pp. 75–82 2017, ISSN 0236–2945
- [8] Clanton N., Opinion: Light pollution ... is it important?, *Lighting Research & Technology* 2014, vol. 46 No. 1, pp. 4 , ISSN 1477–1535
- [9] Żagan W., Opinion: Obtrusive light and floodlighting, *Lighting Research & Technology* 2015, vol. 47, pp. 640, ISSN 1477–1535
- [10] Garner C., Tackling unwanted light: an international perspective, *Light & Engineering* 2002, vol. 20 no. 1, pp.24–39, ISSN 0236–2945
- [11] Gaston K. et al., Reducing the ecological consequences of night–timelight pollution: options and developments, *Journal of Applied Ecology* 2012, vol. 49, pp. 1256–1266, ISSN 0021–8901
- [12] Cinzano P., Falchi F., Quantifying light pollution, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 2014, vol. 137 (May) pp. 13–20, ISSN: 0022–4073, <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2013.11.020>
- [13] Russart K., Nelson R.J., Light at night as an environmental endocrine disruptor, *Physiology & Behavior* 2018, vol. 190, pp. 82–89, ISSN 0031–9384
- [14] Wakefield A. et al., Quantifying the attractiveness of broad– spectrum street lights to aerial nocturnal insects, *Journal of Applied Ecology* 2017, vol. 54 (August), ISSN 0021–8901, doi:10.1111/1365–2664.13004)
- [15] Marcinkowska S., Tęgowska E., Oddziaływanie światła o różnym spectrum na bezkręgowce zmierzchu i pełnego dnia, *Kosmos* 2015, vol. 64, no. 4 (309), pp. 589–597, ISSN 0023–4249
- [16] Le Tallec T., Perret M., They M., Light Pollution Modifies the Expression of Daily Rhythms and Behavior Patterns in a Nocturnal Primate, *Plos One* 2013, Vol, 8, No. 11, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0079250>
- [17] Abbey K. A., Amare M., Night light intensity and women’s body weight: Evidence from Nigeria, *Economics and Human Biology* 2018, vol. 31, pp.238–248, ISSN 1570–677X
- [18] <https://earthtalk.org/light-pollution-breast-cancer/>; dostęp z dnia 18.02.2019

- [19] Keshet–Sitton A., et al., Can Avoiding Light at Night Reduce the Risk of Breast Cancer?, *Integr. Cancer Ther.* 2015, vol. 15, no. 2, pp. 145–152
- [20] Kołomański S., 2013. Zanieczyszczenie światłem i ciemność, *Prace i Studia Geograficzne* 2014, vol. 53, pp. 29–46, ISSN 0208–4589
- [21] P. Cinzano, F. Falchi, The propagation of light pollution in the atmosphere, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 2012, vol. 427, pp. 3337–3357
- [22] Rozporządzenie Komisji (WE) nr 244/209 z dnia 18 marca 2009 r. w sprawie wykonania dyrektywy 2005/32/WE Parlamentu Europejskiego i Rady w odniesieniu do wymogów dotyczących eko projektu dla bezkierunkowych lamp do użytku domowego
- [23] Weisbuch C., Historical perspective on the physics of artificial lighting, *C. R. Physique* 2019, vol. 19, pp. 89–112, ISSN 1631–0705
- [24] Wiśniewski A., Źródła światła, COSIW, 2013, ISBN 978–83–61163–34–3
- [25] <https://zts.pw.edu.pl/index.php/Studia/Absolwenci> ; dostęp z dnia 18.02.2019
- [26] Horváth J., Budapest Diszvilágítás, Tungstram, 1989, ISBN 963–027167–2
- [27] Fabryka Żyrandoli Elektrycznych A. Marciniak – katalog produktów 1934
- [28] Skarżyński K., Iluminacja Pałacyku Rektorskiego na ulicy Koszykowej w Warszawie, praca inżynierska, Wydział Elektryczny, Politechnika Warszawska, 2013
- [29] Kowalska J., Zanieczyszczenie światłem barwnym obrazu miast, *Polish Journal for Sustainable Development* 2017, vol. 21, no. 2, pp. 69–76, ISSN 2450–3746
- [30] Michalak H. Nawarowski A., Iluminacja zieleni jako istotny element struktury przestrzennej, estyki i kompozycji miast, *Technical Transaction – Architecture* 2012, 6a/2012, zeszyt 19, pp. 313– 326
- [31] Żagan W., Masterplany dla oświetlenia miast, *Przegląd Urbanistyczny* 2011, III, pp. 67–69, ISSN 2080–9336,
- [32] Krupiński R., Dwie drogi projektowania iluminacji obiektów, *Przegląd Elektrotechniczny* 2015, R.91 No. 4, pp.179–181, ISSN 0033–2097
- [33] Kubiak K., Iluminacja obiektów – powrót do zapomnianych metod wizualizacji, *Przegląd Elektrotechniczny* 2017, R.87, no. 5, pp. 250–252, ISSN 0033–2097
- [34] Słomiński S, Krupiński R., Luminance distribution projection method for reducing glare and solving object–floodlighting certification problems, *Building and Environment* 2018, vol. 134, no. January, pp. 87–101, ISSN 0360–1323
- [35] Krupiński R., Dynamically Variable Luminance Distribution as the Method of Designing and Architectural Floodlighting, *Proceedings of 2016 IEEE Lighting Conference of the Visegrad Countries, Lumen V4* 2016, pp. 109–112, doi:10.1109/LUMENV.2016.7745527
- [36] Korupczyński R., Dobór wielkości lumenomierzy niekulistych o kształtach mających znaczenie praktyczne, rozprawa doktorska, Wydział Elektryczny, Politechnika Warszawska, 2004
- [37] Żagan W., Object Floodlighting Guidelines, Highlight, WP 03/11, www.highlight-web.de
- [38] Broniewski T., Architektura renesansu i baroku, Zakład Narodowy im. Ossolińskich – Wydawnictwo, Wrocław, 1966

- [39] Żagan W., Skarżyński K., The "Layered Method" – a third method of floodlighting [artykuł w trakcie recenzji]
- [40] Kowalska J., Niejednoznaczności i ograniczenia w określaniu jakości oddawania barw źródeł światła wskaźnikiem Ra (CIE CRI)", *Przegląd Elektrotechniczny* 2017, R. 93 No.5, pp. 74–78, ISSN 0033–2097 <http://pe.org.pl/articles/2017/5/14.pdf>, DOI: 10.15199/48.2017.05.14,
- [41] Houser K. W., If not CRI , then what ?, *The Journal of the Illuminating Engineering Society of North America LEUKOS* 2013, vol. 9, no. 3, pp. 151–153, <https://doi.org/10.1080/15502724.2013.10732183>
- [42] Bullough JD, et al., Predicting discomfort glare from outdoor lighting installations, *Lighting Research & Technology* 2008, vol. 40, No. 3, pp. 225–242, ISSN 1477–1535
- [43] Mangkuto R.A., et al., Assessment of pitch floodlighting and glare condition in the Main Stadium of Gelora Bung Karno, Indonesia, *Measurement* 2018, vol.117, pp. 186–199, ISSN 0263–2241
- [44] Skarżyński K., Field measurements of Floodlighting Utilisation Factor, *Proceedings of 2016 IEEE Lighting Conference of the Visegrad Countries, Lumen V4 2016*, pp. 1–4, doi: 10.1109/LUMENV.2016.7745537
- [45] Bewszko T., Wachta H.: Wielokryterialne wspomaganie planowania iluminacji obiektów architektonicznych, *Przegląd Elektrotechniczny* 2011, R.87, no. 8, pp 21–25, ISSN 0033–2097
- [46] Wachta H., Bojda P., Usability of luminaries with LED sources to illuminate the window areas of architectural objects, *The 13th conference on selected issues of electrical engineering and electronics wzee 2016*, doi: 10.1109/WZEE.2016.7800250
- [47] Kowlaska M., Żagan W., The aesthetics of lighting, *Przegląd Elektrotechniczny* 2017, R. 93, no. 7, pp. 144–147, ISSN 0033–2097
- [48] Dugar AM, The role of poetics in architectural lighting design, *Lighting Research & Technology* 2016, vol. 50, no. 2, pp. 253–265, ISSN 1477–1535
- [49] Lynes J., Opinion: Lighting is a language, *Lighting Research & Technology* 2013, vol. 45, no. 6, pp. 640, ISSN 1477–1535
- [50] Schepetkov N.I., The art of Berlin lighting, *Light & Engineering* 2011, vol. 19, no. 3, pp. 78–86, ISSN 0236–2945
- [51] Schepetkov N.I., Light design (Impression of the specialist), *Light & Engineering* 2008, vol. 16, no. 3, pp. 106–116, ISSN 0236–2945
- [52] Commission Internationale de l’Eclairage, CIE 094: Guide for Floodlighting, CIE, Vienna, 1993
- [53] Commission Internationale de l’Eclairage, CIE 126: Guidelines for minimizing sky glow, CIE, Vienna, 1997
- [54] Commission Internationale de l’Eclairage CIE 150: Guide on the Limitation of the Effects of Obtrusive Light from Outdoor Lighting Installation, CIE, Vienna, 2017
- [55] EN 12464–2: Light and Lighting – Lighting of work places – Part 2: Outdoor work places, CEN, Brussels, 2014

- [56] DYREKTYWA 2006/32/WE PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO I RADY z dnia 5 kwietnia 2006 r. w sprawie efektywności końcowego wykorzystania energii i usług energetycznych oraz uchylająca dyrektywę Rady 93/76/EWG
- [57] ROZPORZĄDZENIE KOMISJI (UE) NR 651/2014 z dnia 17 czerwca 2014 r.
- [58] Pracki P., System oceny efektywności energetycznej oświetlenia wnętrz i dróg, Prace naukowe – elektryka z.143, OWPW, 2012, ISSN 0137–2319
- [59] Marzecki J., Metody prognozowania mocy i energii elektrycznej w elektroenergetycznych sieciach rozdzielczych, Przegląd Elektrotechniczny 2006, R.82, no. 4, pp. 70–80, ISSN 0033–2097
- [60] <https://www.iea.org/> ; dostęp z dnia 18.02.2019
- [61] IEA: Light's Labour's Lost, Policies and Energy – efficient Lightingm Actis, Paryż 2006
- [62] PN–EN 15193, Charakterystyka energetyczna budynków – Wymagania energetyczne dotyczące oświetlenia, PKN, Warszawa, 2010
- [63] PN–EN 13201–5:2016–03, Oświetlenie dróg – Część 5: Wskaźniki efektywności energetycznej, PKN, Warszawa, 2016
- [64] <https://www.iea.org/tcep/buildings/lighting/EE> ; dostęp z dnia 18.02.2019
- [65] Kowalska J., Fryc I., Analiza porównawcza metod oceny jakości oddawania barw źródeł światła przy użyciu wskaźników CIE Ra, NIST CQS oraz IES TM–30–15 Rf i Rg, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej 2017, vol 54, pp. 139–144, ISSN 2353–1290
- [66] <https://www.ledvance.pl/produkty/informacje-o-produktach/podstawowa-wiedza-o-led/cykl-zycia-led/index.jsp> ; dostęp z dnia 18.02.2019
- [67] Zhang J.P., et al, An optimized model for lifetime prediction of LED–based light bars using luminance degradation method, Lighting Research & Technology 2016, vol. 50, no. 2, pp 316–325, ISSN 1477–1535
- [68] Mirowski J., et al., Harmoniczne prądu w instalacjach oświetleniowych, Przegląd Elektrotechniczny 2015, R. 91, No. 8, pp.180–184, ISSN 0033–2097
- [69] <http://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/srodowisko-energia/raporty> GUS 2006–2016 ; dostęp z dnia 18.02.2019
- [70] ROZPORZĄDZENIE MINISTRA GOSPODARKI z dnia 10 sierpnia 2012 r. w sprawie szczegółowego zakresu i sposobu sporządzania audytu efektywności energetycznej, wzoru karty audytu efektywności energetycznej oraz metod obliczania oszczędności energii
- [71] PN–EN 12464–1, Światło i oświetlenie – Oświetlenie miejsc pracy – Część 1: Miejsca pracy we wnętrzach, PKN, Warszawa, 2012
- [72] PN–EN 13201–2–03, Oświetlenie dróg – Część 2: Wymagania eksploatacyjne, PKN, Warszawa, 2016
- [73] <http://nfosigw.gov.pl/oferta-finansowania/srodki-krajowe/programypriorytetowe/owietleniezewntrzne/i-nabor-2018/> ; dostęp z dnia 18.02.2019

- [74] Viellegas JT., Energy, present and future, *Light & Engineering* 2007, vol. 15, no. 3, pp. 48–54, ISSN 0236–2945
- [75] Aizenberg J., Energy saving is one of the most important problem of present day lighting engineering, *Light & Engineering* 2007, vol. 15, no. 4, pp. 5–11, ISSN 0236–2945
- [76] Grzonkowski J., Energooszczędność oświetlenia w Polsce. Rzeczywistość roku 2014. Fakty i złudzenia., referat na V Konferencji Naukowo–Technicznej cyklu „Energooszczędność w oświetleniu”, Poznań, 13 maja 2014 r..
- [77] Johansson M., Kuller M., Pedersen E., Understanding a housing cooperatives’ reasons for rejecting energy–efficient outdoor lighting, *Lighting Research & Technology* 2015, vol. 47, no. 7, pp. 876–892, ISSN 1477–1535
- [78] Waide P., The role of energy efficiency in domestic appliances and lighting of habitable premises 2010, *Light & Engineering*, vol. 18, no. 1, pp. 5–7, ISSN 0236–2945
- [79] Gayral B., LEDs for lighting: Basic physics and prospects for energy savings, *C. R. Physique* 2017, vol. 18, pp.453–561, ISSN 1631–0705
- [80] El–Zein N., Sustainability, Energy and Architecture – Case studies in realizing green buildings: Chapter 7 – The LED Lighting Revolution, pp. 171–194, Academic Press 2013, ISBN 978–0–12–397269–9
- [81] Pracki P., Błaszczak U., The issues of interior lighting on the example of an educational building adjustment to nZEB standard, *Proceedings of 2016 IEEE Lighting Conference of the Visegrad Countries, Lumen V4 2016*, pp. 1–6, doi: 10.1109/LUMENV.2016.7745532
- [82] Kyba C., Kuester T., Kuechly H.U., Changes in outdoor lighting in Germany from 2012–2016, *International Journal of Sustainable Lighting* 2017, vol. 19, no. 2, pp. 112–123 , <https://doi.org/10.26607/ijsl.v19i2.79>
- [83] Bierman A., Will switching to LED outdoor lighting increase sky glow?, *Lighting Research & Technology* 2012, vol. 44, no. 4, pp. 449–458, ISSN 1477–1535
- [84] <http://lightpollution.pk.edu.pl/konf2015/index.php> ; dostęp z dnia 18.02.2019
- [85] Hänel A., et al., Measuring night sky brightness: methods and challenges, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 2018, vol. 205 (January), pp. 278–290, doi: 10.1016/j.jqsrt.2017.09.008
- [86] Gallaway T., Olsen R.N., Mitchell D. M., The economics of global light pollution, *Ecological Economics* 2010, vol. 69, no. 3, pp. 658–665, <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.10.003>
- [87] Bogusz W., Garbarczyk J.E., Krok F., *Podstawy fizyki, OWPW*, Warszawa, 2016, ISBN 978–83–7814–511–0
- [88] <https://jgroub.wordpress.com/2018/09/28/september-28-2018-the-bottle-scale-or-why-gas-is-your-friend/> ; dostęp z dnia 18.02.2019
- [89] Solano Lamphar HA, Kocifaj M., Light Pollution in Ultraviolet and Visible Spectrum: Effect on Different Visual Perceptions, *PLoS ONE* 2013, vol. 8, no. 2,doi: 10.1371/journal.pone.0056563

- [90] Kocifaj, M., Light pollution simulations for planar ground-based light sources, *Applied Optics* 2008, vol. 47, no. 6, pp.792–798, DOI 10.1364/AO.47.000792
- [91] Falchi, F., et al., Limiting the impact of light pollution on human health, environment and stellar visibility, *Journal of Environmental Management* 2011, vol. 92 no. 10, pp. 2714–22, doi: 10.1016/j.jenvman.2011.06.029
- [92] Fryc I., Tabaka P., Zanieczyszczenia nocnego nieboskłonu światłem emitowanym przez oprawy oświetlenia zewnętrznego, *Przegląd Elektrotechniczny* 2017, R. 93 no. 6, pp. 46–49, ISSN 0033–2097
- [93] Espey B., McCauley J., Initial Irish light pollution measurements and a new Sky Quality Meter-based data logger, *Lighting Research & Technology* 2014, vol. 46, no. 1, pp. 67–77, ISSN 1477–1535
- [94] Kollath Z., Kranicz B., Gyutai V., Pomiar zanieczyszczenia światłem, *Przegląd elektrotechniczny* 2008, R.8, no. 8, pp. 80–83, ISSN 0033–2097
- [95] Falchi F., Campaign of sky brightness and extinction measurements using a portable CCD camera, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2011, vol. 412, pp. 33–48, doi:10.1111/j.1365–2966.2010.17845.x
- [96] <https://www.lightpollutionmap.info/> ; dostęp z dnia 18.02.2019
- [97] <http://lightpollution.pk.edu.pl/jednostki.php> ; dostęp z dnia 18.02.2019
- [98] Lacoeyuilhe A., et al., The Influence of Low Intensities of Light Pollution on Bat Communities in a Semi-Natural Context, *Plos One* 2014, vol. 9, no. 10, doi:10.1371/journal.pone.0103042
- [99] Nordt A., Klenke R., Sleepless in Town – Drivers of the Temporal Shift in Dawn Song in Urban European Blackbirds, *PLoS ONE* 2013, vol. 8, no. 8, doi:10.1371/journal.pone.0071476
- [100] Dacke M., Baird E., Byrne M., Dung Beetles Use the Milky Way for Orientation 2013, *Current Biology* vol. 23, no. 4, pp. 298–300, <https://doi.org/10.1016/j.cub.2012.12.034>
- [101] Scholtz C.H, et al., Effect of different light quality of LED on growth and photosynthetic character in cherry tomato seedling, *Acta Hort.* 2011, vol. 907, pp. 325–330, 10.17660/ActaHortic.2011.907.53
- [102] Ścieżor T., Balcerzak W., Wpływ zanieczyszczenia świetlnego na eutrofizację zbiornika Dobczyckiego, *Kosmos* 2015, vol. 64, no. 4 (309), pp. 599–610, ISSN 0023–4249
- [103] Ho C.Y., Lin H.T., Analysis of and control policies for light pollution from advertising signs in Taiwan, *Lighting Research & Technology* 2015, vol. 47, no. 8, pp. 931–944, ISSN 1477–1535
- [104] Cha JS, et al., Policy and status of light pollutionmanagement in Korea, *Lighting Research & Technology* 2014, vol. 46, np. 1, pp. 78–88, ISSN 1477–1535
- [105] Saraiji R., Saju Oommen M., Light Pollution Index (LPI): An Integrated Approach to Study Light Pollution with Street Lighting and Façade Lighting, *The Journal of the Illuminating Engineering Society of North America LEUKOS* 2012, vol. 9, no. 2, pp. 127–145, doi: 10.1582/LEUKOS.2012.09.02.004
- [106] <http://www.artificiallightatnight.org/> ; dostęp z dnia 18.02.2019
- [107] <http://www.polaris.org.pl/> ; dostęp z dnia 18.02.2019
- [108] <https://www.ciemnieniebo.pl/pl/> ; dostęp z dnia 18.02.2019

- [109] http://www.polaris.org.pl/Zaczynj_sciemniac ; dostęp z dnia 18.02.2019
- [110] <http://www.izera-darksy.eu/index-pl.html> ; dostęp z dnia 18.02.2019
- [111] <http://www.wygasz.edu.pl/index.php/main-page.html> ; dostęp z dnia 18.02.2019
- [112] Banach M., Podstawy techniki oświetlenia, PWN, Warszawa 1982
- [113] Bąk J., Obliczanie oświetlenia ogólnego wewnątrz, WNT, Warszawa, 1983
- [114] Skarżyński K., Iluminacja obiektów architektonicznych a zanieczyszczenie środowiska światłem, Kosmos 2015, vol. 64, no. 4 (309), pp. 553–562, ISSN 0023–4249
- [115] Słomiński, S. Identifying problems with luminaire luminance measurements for discomfort glare analysis, Lighting Research & Technology 2016, vol. 48, no. 5, ISSN 1477–1535
- [116] Żagan W., Podstawy Techniki Świetlnej, OWPW, Warszawa, 2014
- [117] Skarżyński K., Żagan W., Factors Having a Crucial Impact on Energy Efficiency of Floodlighting, Proceedings of VII. Lighting Conference of Visegrad Countries LUMEN V4 2018, pp. 1–5, doi: 10.1109/LUMENV.2018.8521042
- [118] Skarżyński K., An attempt at controlling the utilisation factor and light pollution within the context of floodlighting, Przegląd Elektrotechniczny 2016, R. 92, no. 9., pp. 178 – 181, ISSN 0033–2097
- [119] Hecht S., The visual discrimination of intensity and the Weber–Fechner law, Journal for General Psychology 1924, vol. 7 no. 2, pp. 235–267, <https://doi.org/10.1085/jgp.7.2.235>
- [120] Skarżyński K., Methods of calculation of floodlighting utilisation factor at the design stage, Light & Engineering 2018, vol.26, no. 1, pp. 144–152, ISSN 0236–2945
- [121] <https://knowledge.autodesk.com/search?search=light%20meter&p=3DSMAX&sort=score;> dostęp z dnia 25.02.2019
- [122] Kołodziej M., Iluminacja neogotyckich obiektów architektury sakralnej, rozprawa doktorska, Wydział Elektryczny, Politechnika Warszawska, 2007
- [123] <http://cena-pradu.pl/tabela.html> ; dostęp z dnia 18.02.2019

KARTY KATALOGOWE OPRAW OŚWIETLENIOWYCH

Dostęp do wszystkich kart katalogowych z dnia 18.02.2019

OBIEKT ROZŁOŻYSTY

Metoda zalewowa:

[A1] <https://www.meyer-lighting.com/de/produkte/superlight/882614000.html>

[B1] <https://www.meyer-lighting.com/de/produkte/superlight/886614002.html>

Metoda punktowa:

[A2] <https://www.assets.lighting.philips.com/is/content/PhilipsLighting/fbc2d069a97140a09350a7f6014e1603>

[B2] <https://s.bega.com/fp-0236781361169165637944/media/pim/import/scr-1otv7zo/dokumente/db/84505.db.en.pdf>

[C2] <https://www.meyer-lighting.com/de/produkte/superlight/886504000.html>

[D2] <https://www.meyer-lighting.com/de/produkte/nightscape/892204000.html>

[E2] <https://www.meyer-lighting.com/de/produkte/fluxa/827304100.html>

[F2] <https://www.meyer-lighting.com/de/produkte/fluxa/827104100.html>

[G2] <https://www.meyer-lighting.com/de/produkte/superlight/886614002.html>

[H2] <https://www.meyer-lighting.com/de/produkte/uplight/860311100.html>

[I2] <https://s.bega.com/fp-0228856429589332266204/media/pim/import/scr-1bq1ccu/dokumente/db/77024.db.en.pdf>

[J2] <https://s.bega.com/fp-023868357288101765339418/media/pim/import/scr-1rz4bl4/dokumente/db/77363.db.en.pdf>

OBIEKT STRZELISTY

Metoda zalewowa:

[A3] <https://s.bega.com/fp-022918581353101446579713/media/pim/import/scr-1c9nbs9/dokumente/db/84542.db.en.pdf>

[B3] <https://s.bega.com/fp-021257167611101051436224/media/pim/import/scr-kshgqj/dokumente/db/84541.db.en.pdf>

[C3] <https://s.bega.com/fp-02688196662101966193023/media/pim/import/scr-bdqfxy/dokumente/db/77852.db.en.pdf>

[D3] <https://s.bega.com/fp-023868357288101765339418/media/pim/import/scr-1rz4bl4/dokumente/db/77363.db.en.pdf>

Metoda punktowa:

[A4] <https://s.bega.com/fp-022918581353101446579713/media/pim/import/scr-1c9nbs9/dokumente/db/84542.db.en.pdf>

[B4] <https://s.bega.com/fp-026278769569745515135/media/pim/import/scr-adtkyk/dokumente/db/84540.db.en.pdf>

- [C4] <https://s.bega.com/fp-02688196662101966193023/media/pim/import/scr-bdqfxy/dokumente/db/77852.db.en.pdf>
- [D4] <https://s.bega.com/fp-023868357288101765339418/media/pim/import/scr-1rz4b14/dokumente/db/77363.db.en.pdf>
- [E4] <https://s.bega.com/fp-021235877145101736379000/media/pim/import/scr-kft4wp/dokumente/db/77916.db.en.pdf>
- [F4] <https://s.bega.com/fp-0236781361169165637944/media/pim/import/scr-1otv7zo/dokumente/db/84505.db.en.pdf>
- [G4] <https://s.bega.com/fp-0215921870789350692932/media/pim/import/scr-qby3eu/dokumente/db/84545.db.en.pdf>

OBIEKT INŻYNIERYJNY:

- [A5] <https://s.bega.com/fp-0226619530329732676519/media/pim/import/scr-180uw3s/dokumente/db/77362.db.en.pdf>
- [B5] <https://www.meyer-lighting.com/de/produkte/nightscape/891204300.html>
- [C5] <https://s.bega.com/fp-0242919325101435725884/media/pim/import/scr-pjwrh/dokumente/db/77659.db.en.pdf>
- [D5] <https://www.meyer-lighting.com/de/produkte/superlight/886614000.html>

OBIEKT ZLOKALIZOWANY W PIERZEI:

Metoda zalewowa:

- [A6] <https://www.meyer-lighting.com/de/produkte/superlight-compact/886204103.html>
- [B6] Meyer Superlight Compact Mini 20W sw, 1600lm
[produkt wycofany z oferty firmy Meyer]
- [C6] <https://www.meyer-lighting.com/de/produkte/superlight-compact/886804103.html>

Metoda punktowa:

- [A7] <https://www.meyer-lighting.com/de/produkte/uplight/861601200.html?filter=hid>
- [B7] http://gtglux.ge/_GTG/files/Decorative-lighting/Led%20line.pdf
[produkt wycofany z oferty firmy Philips Lighting]
- [C7] <https://lumsearch.com/en/article/oom2If3PQsWCn03hG2xZRQ>

OBIEKT NOWOCZESNY:

Metoda zalewowa:

- [A8] <https://s.bega.com/fp-022925416925101262811292/media/pim/import/scr-1cdpu59/dokumente/db/66978.db.en.pdf>
- [B8] <https://s.bega.com/fp-022925416925101262811292/media/pim/import/scr-1cdpu59/dokumente/db/66978.db.en.pdf>
- [C8] http://www.lighting.philips.com/prof/outdoor-luminaires/sports-and-area-floodlighting/area-and-recreational-floodlighting/clearflood-large/912300023739_EU/product
- [D8] <https://s.bega.com/fp-021884702913101812443397/media/pim/import/scr-v63q2p/dokumente/db/77892.db.en.pdf>

Metoda punktowa:

- [A9] <https://s.bega.com/fp-022925416925101262811292/media/pim/import/scr-1cdpu59/dokumente/db/66978.db.en.pdf>
- [B9] <https://s.bega.com/fp-022925416925101262811292/media/pim/import/scr-1cdpu59/dokumente/db/66978.db.en.pdf>
- [C9] <https://s.bega.com/fp-023868357288101765339418/media/pim/import/scr-1rz4b14/dokumente/db/77363.db.en.pdf>
- [D9] <https://s.bega.com/fp-023618420638101416610117/media/pim/import/scr-1nubb8e/dokumente/db/84162.db.en.pdf>
- [E9] <https://www.meyer-lighting.com/de/produkte/uplight/860601200.html>

BIAŁY DOMEK:

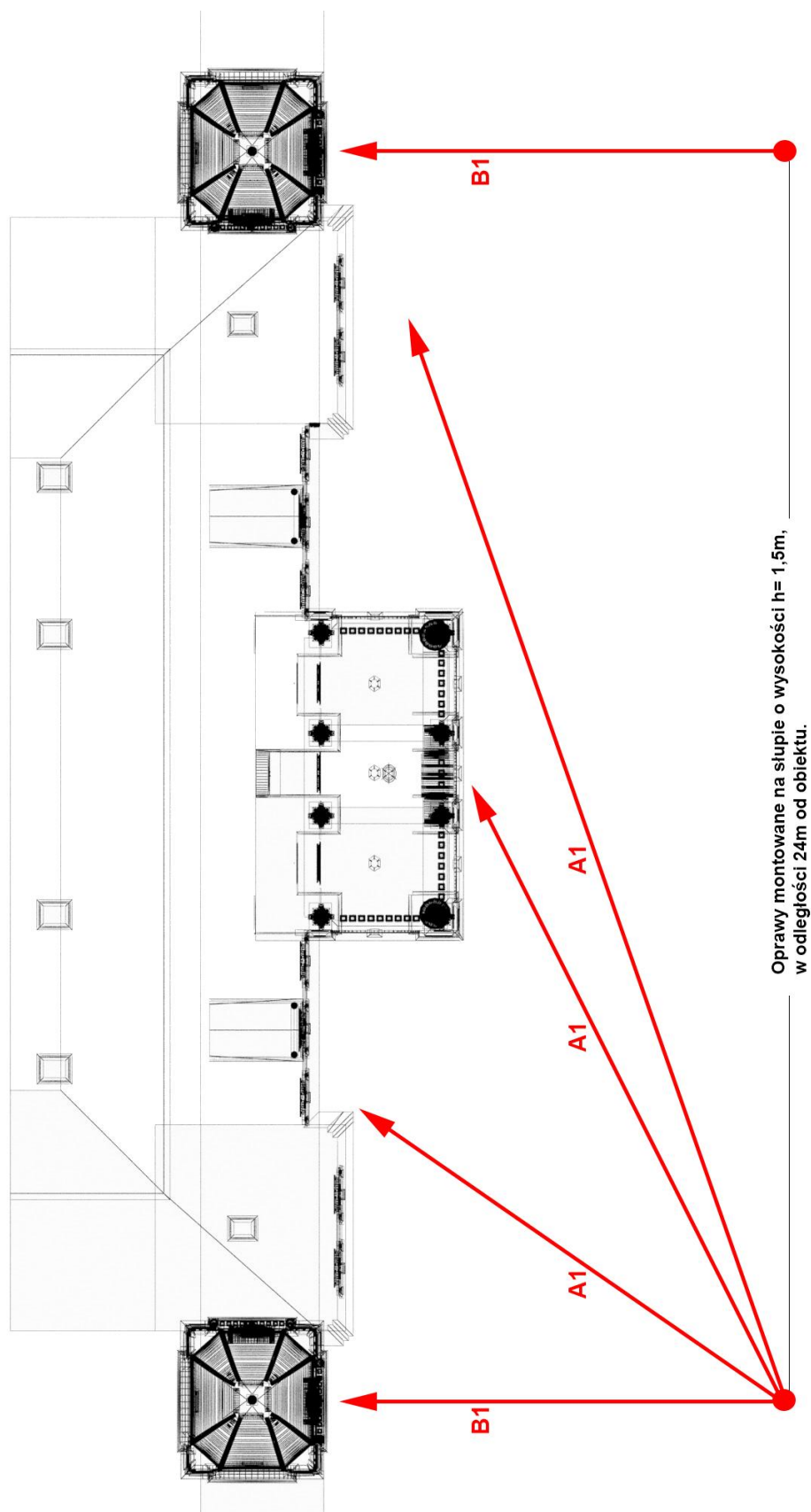
Metoda zalewowa:

- [A10] <https://s.bega.com/fp-023735540982101858211610/media/pim/import/scr-1ps1lva/dokumente/db/77749.db.en.pdf>
- [B10] <https://s.bega.com/fp-029426461709913117857/media/pim/import/scr-fl86fu/dokumente/db/77700.db.en.pdf>
- [C10] <https://s.bega.com/fp-021611420157101920424810/media/pim/import/scr-qnebr1/dokumente/db/77709.db.en.pdf>

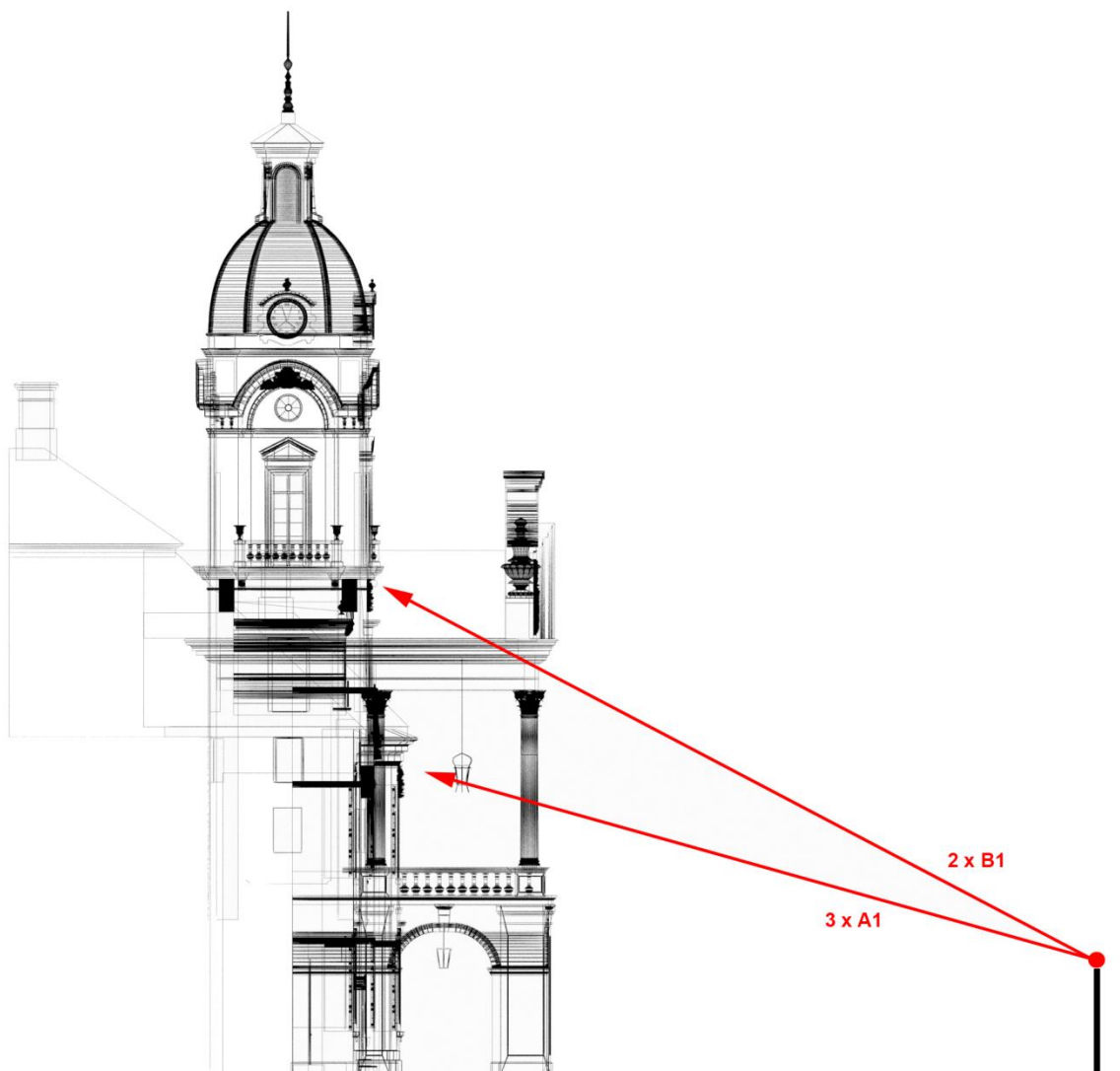
Metoda punktowa:

- [A11] <https://s.bega.com/fp-021235877145101736379000/media/pim/import/scr-kft4wp/dokumente/db/77916.db.en.pdf>
- [B11] <https://www.assets.lighting.philips.com/is/content/PhilipsLighting/fbc2d069a97140a09350a7f6014e1603>

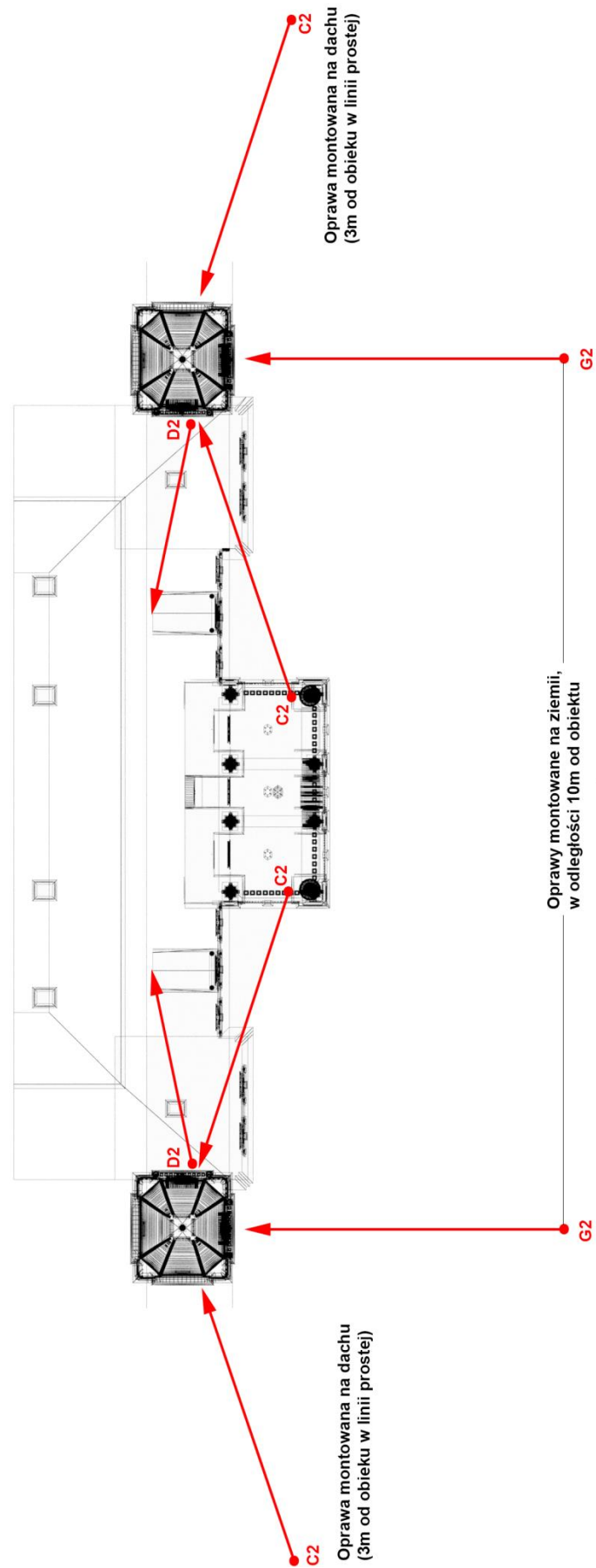
ZAŁĄCZNIK A: Schematyczne rozmieszczenie opraw oświetleniowych dwóch koncepcji projektu iluminacji obiektu rozłożystego



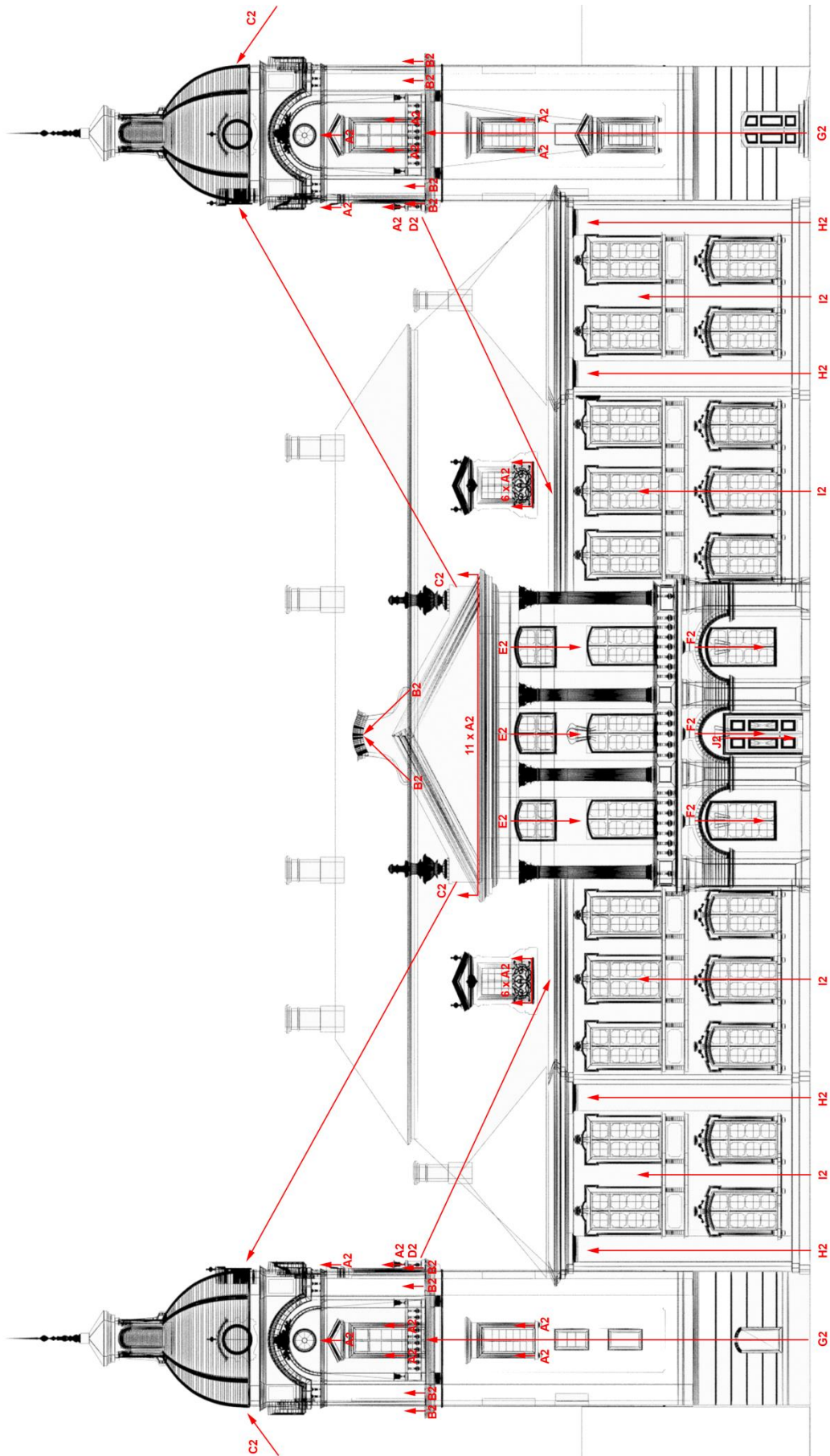
Rys. Z.A.1. Obiekt rozłożysty, metoda zalewowa – widok z góry



Rys. Z.A.2. Obiekt rozłożysty, metoda zalewowa – widok z boku

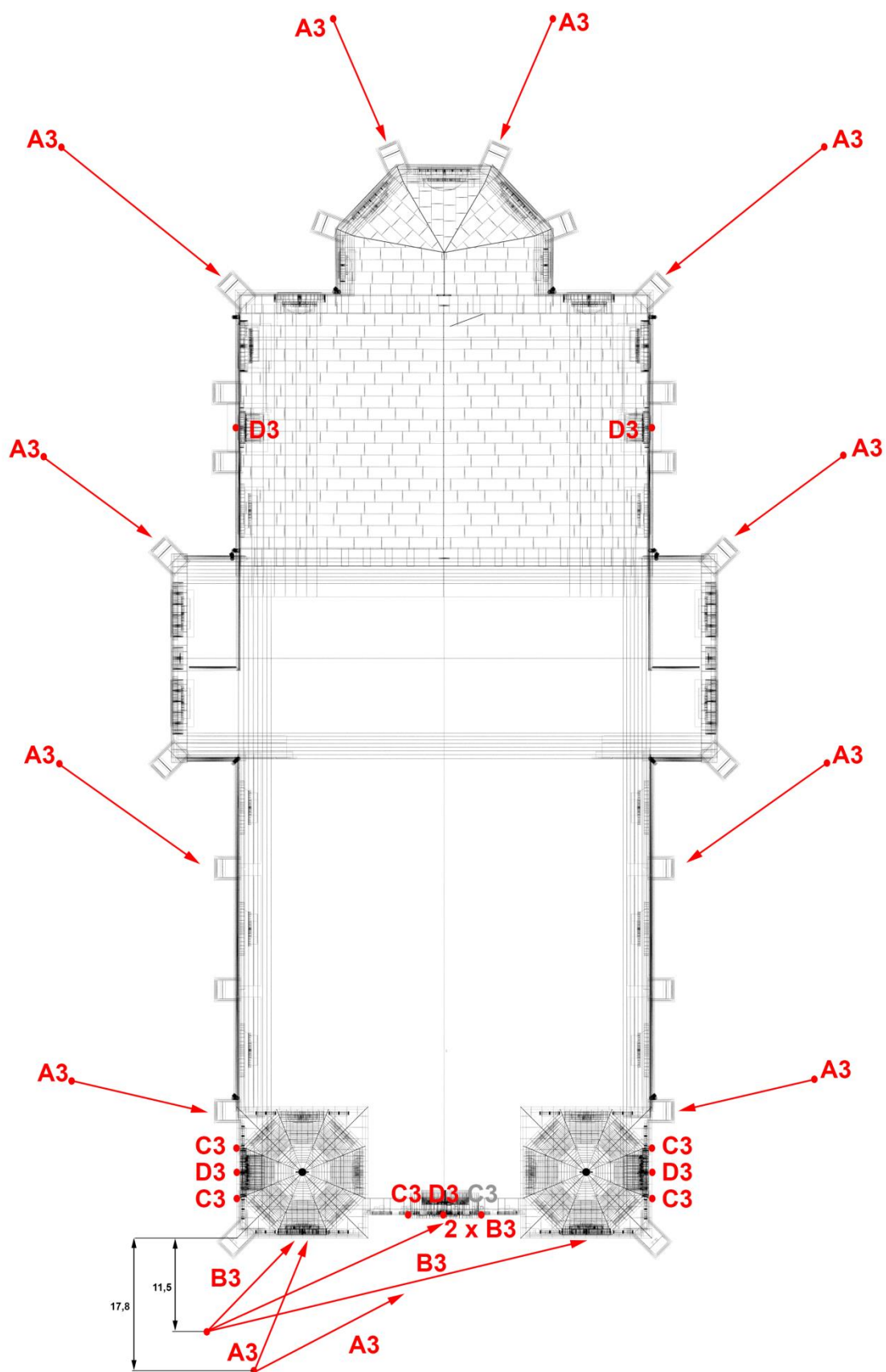


Rys. Z.A.3. Obiekt rozłożysty, metoda punktowa – widok z góry

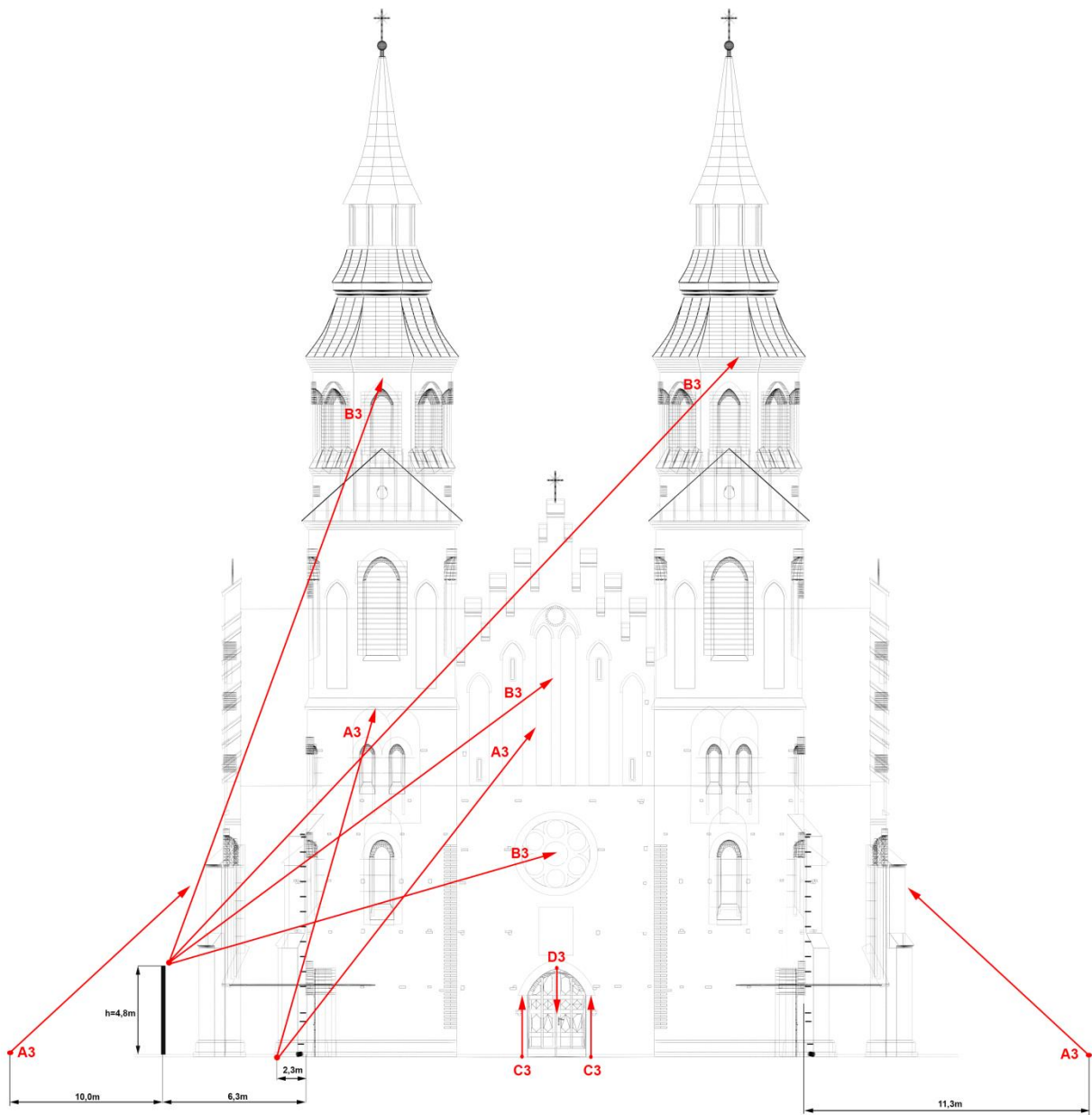


Rys. Z.A.4. Obiekt rozłożysty, metoda punktowa – widok od frontu

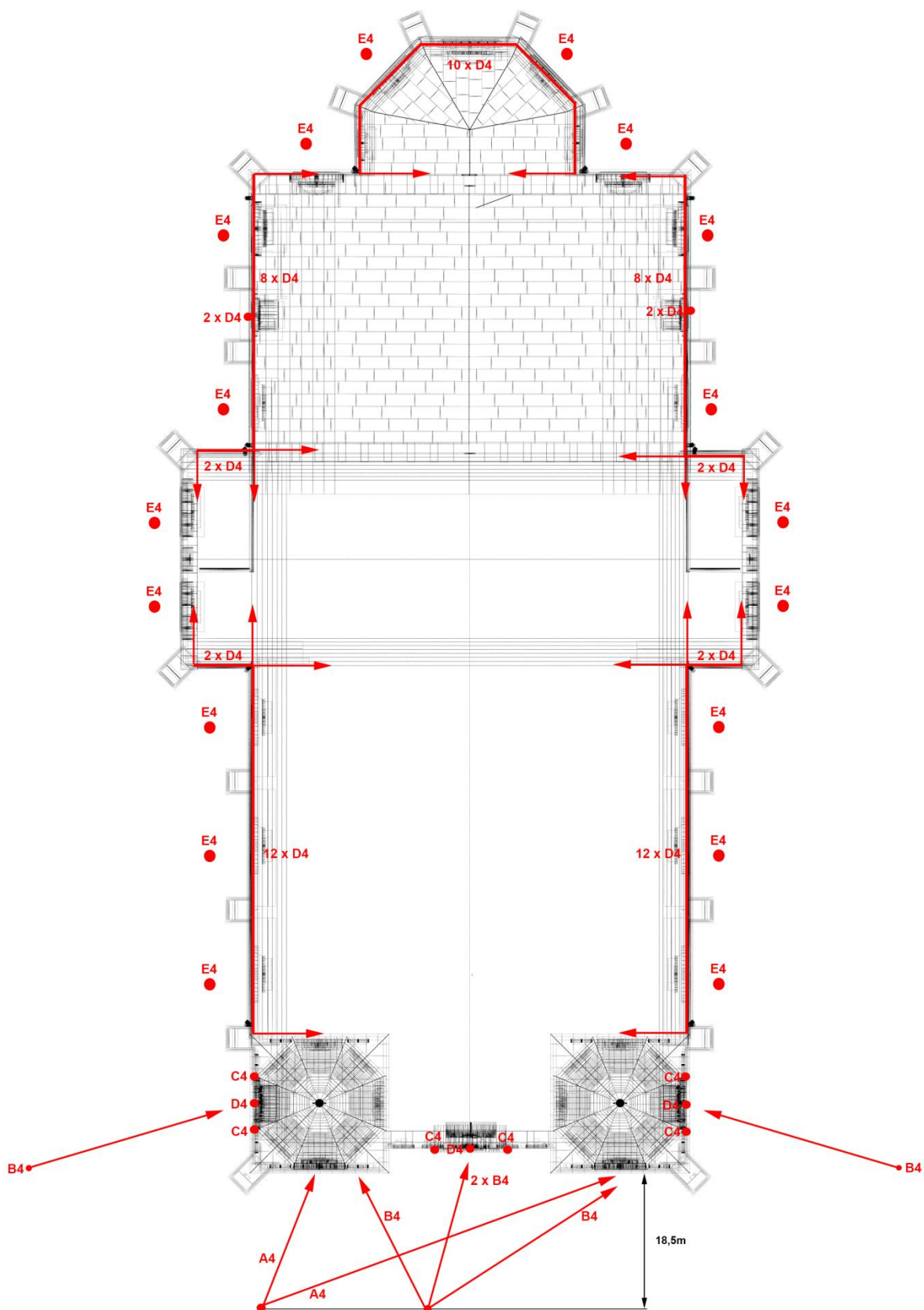
ZAŁĄCZNIK B: Schematyczne rozmieszczenie opraw oświetleniowych dwóch koncepcji projektu iluminacji obiektu strzelistego



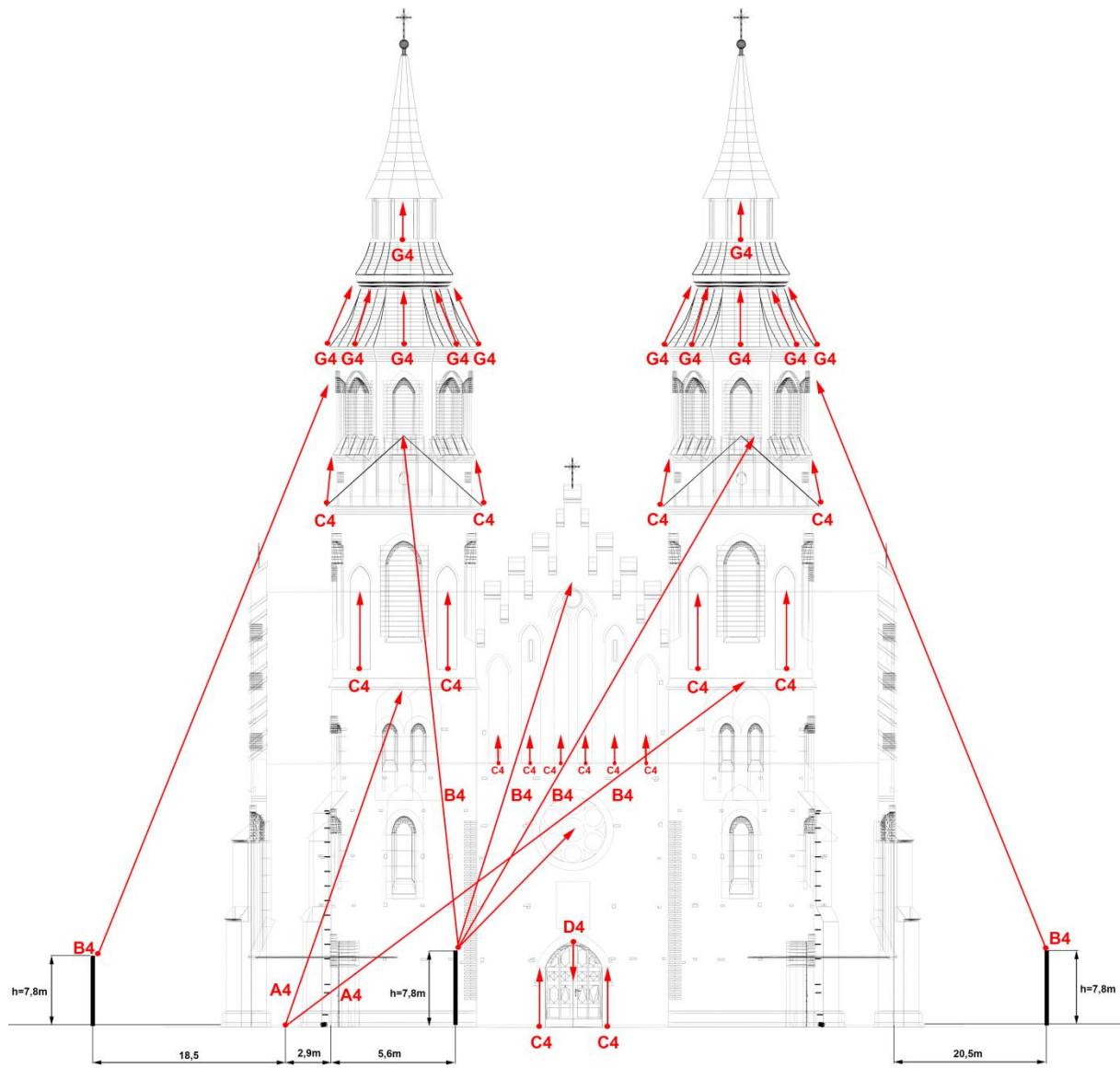
Rys. Z.B.1. Obiekt strzelisty, metoda zalewowa – widok z góry



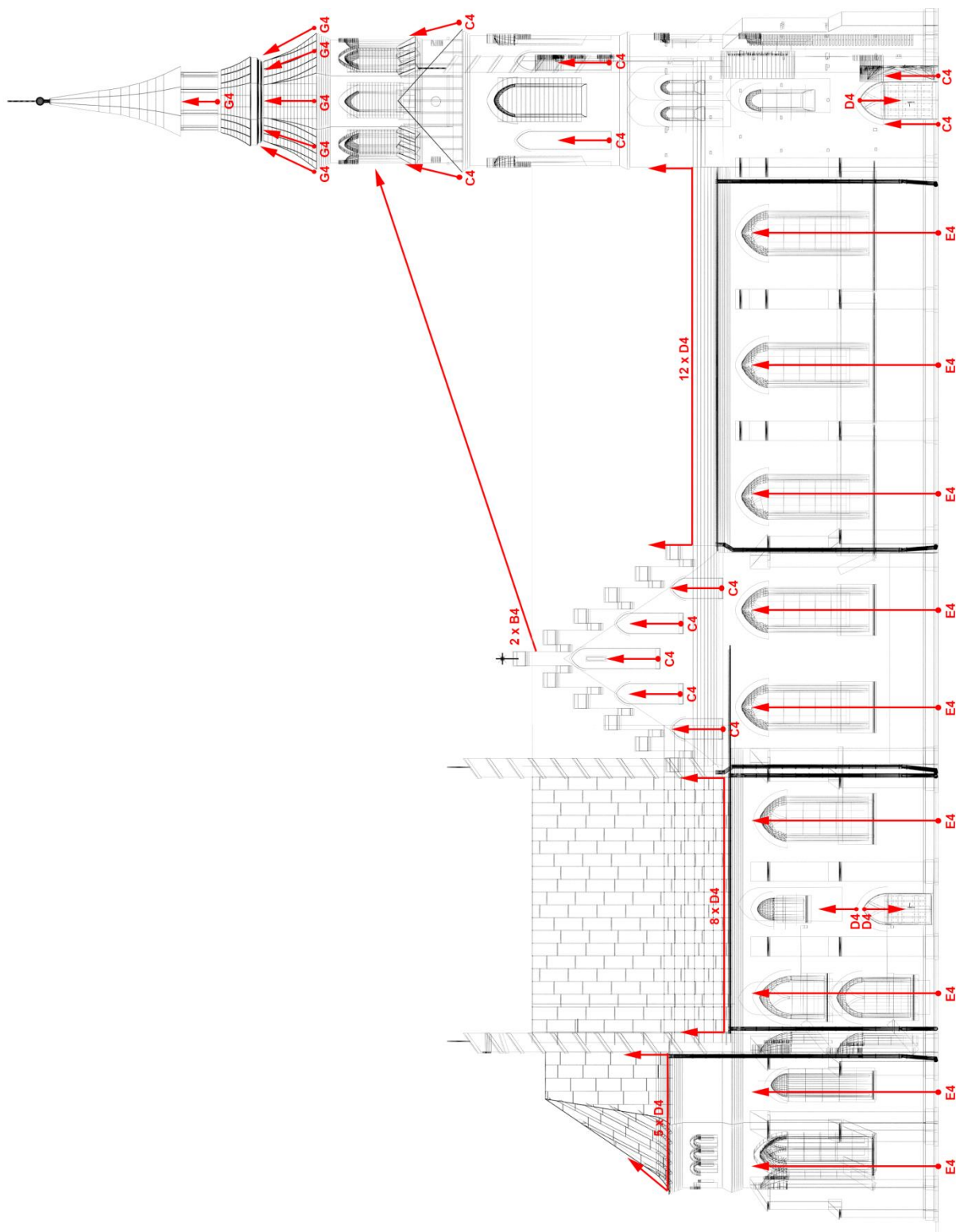
Rys. Z.B.2. Obiekt strzelisty, metoda zalewowa – widok od frontu



Rys. Z.B.3. Obiekt strzelistwy, metoda punktowa – widok z góry



Rys. Z.B.4. Obiekt strzelisty, metoda punktowa – widok od frontu

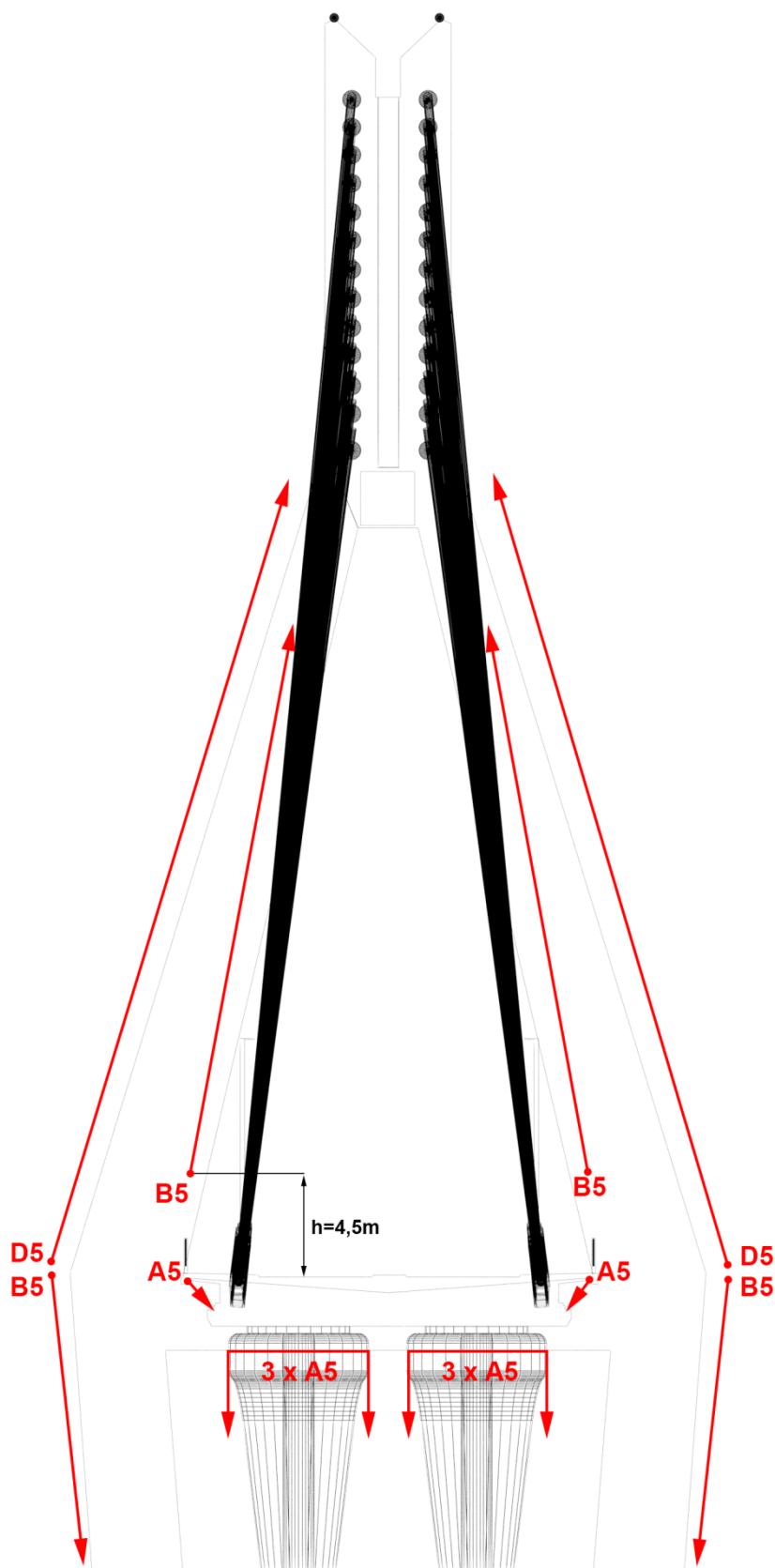


Rys. Z.B.5. Obiekt strzelisty, metoda punktowa – widok z boku

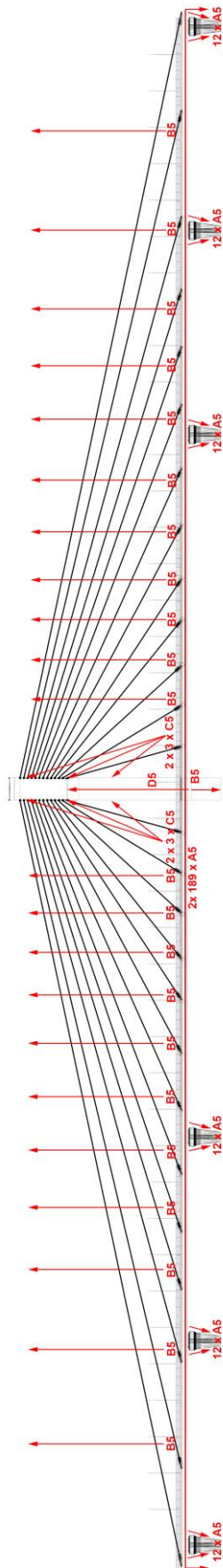
Uwaga:

– w koncepcji punktowej oprawy typu E4 montowane w odległości 1,0m od elewacji.

ZAŁĄCZNIK C: Schematyczne rozmieszczenie opraw oświetleniowych dwóch projektu iluminacji obiektu inżynierskiego

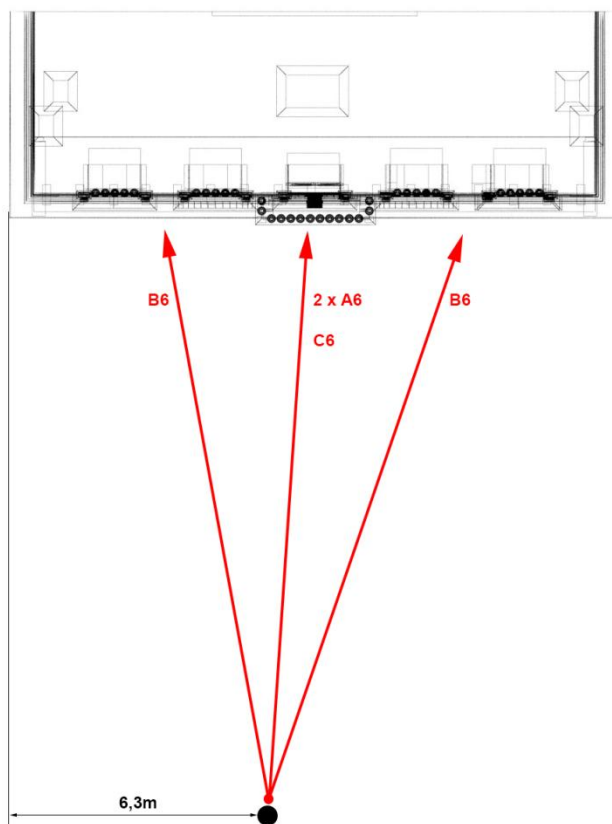


Rys. Z.C.1. Obiekt inżynierski – widok od frontu

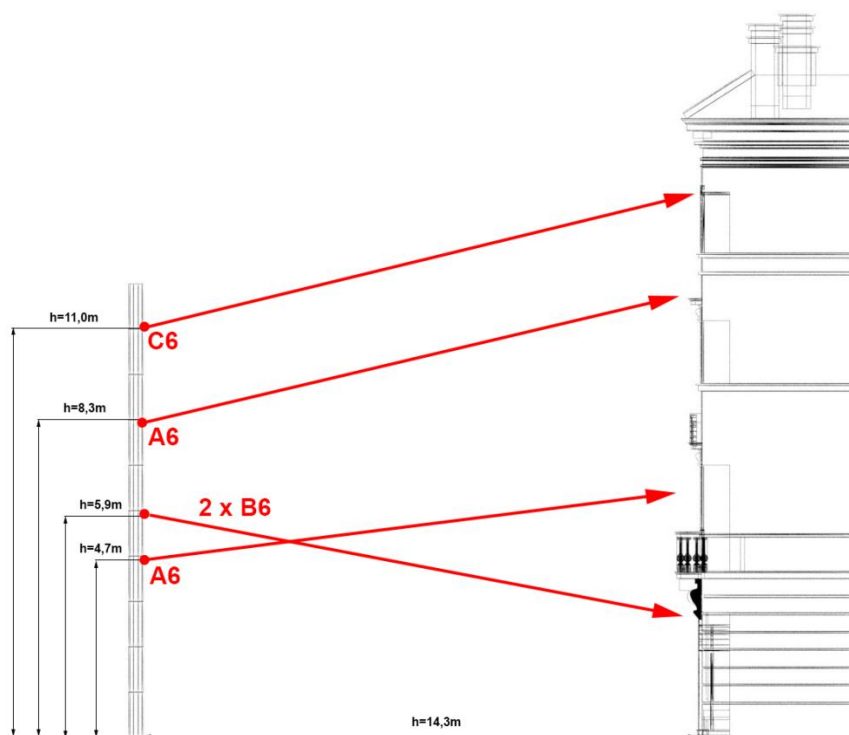


Rys. Z.C.2. Obiekt inżynieryjny – widok z boku

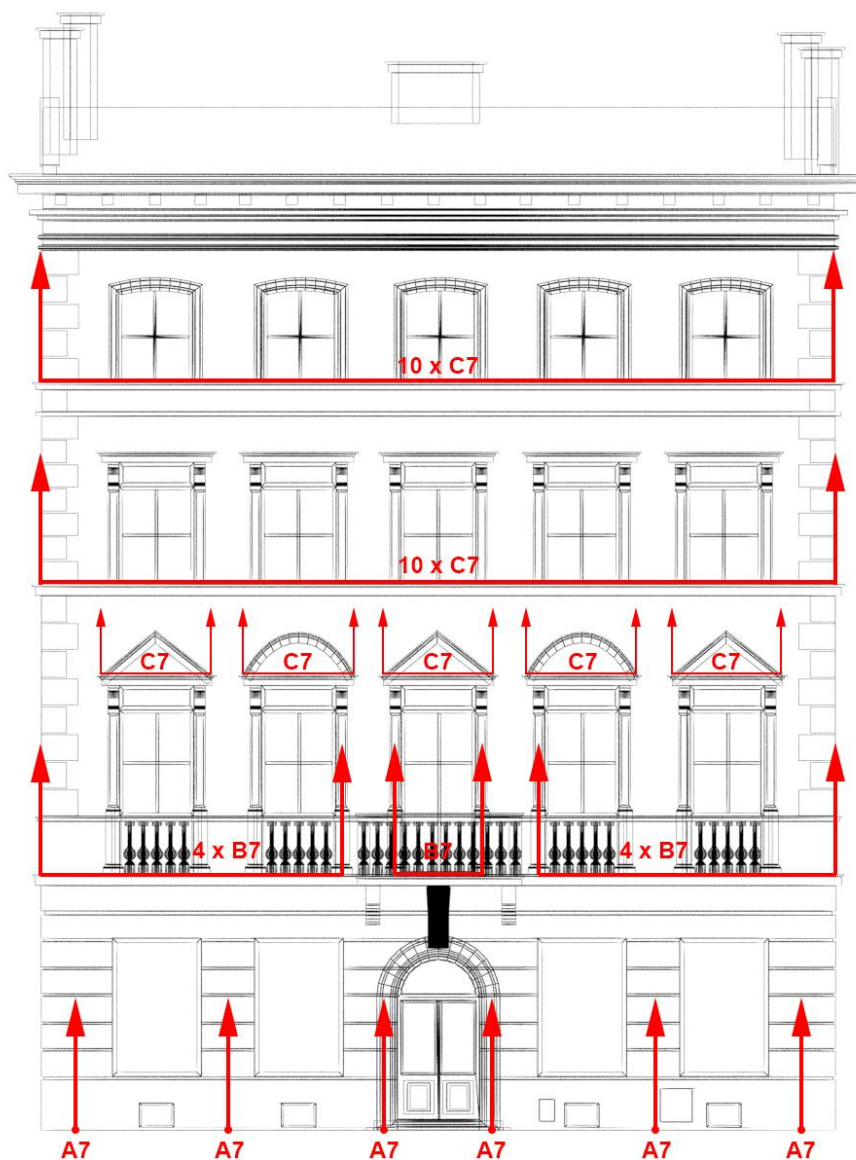
ZAŁĄCZNIK D: Schematyczne rozmieszczenie opraw oświetleniowych dwóch koncepcji projektu iluminacji obiektu zlokalizowanego w pierzei



Rys. Z.D.1. Obiekt zlokalizowany w pierzei, metoda zalewowa – widok z góry



Rys. Z.D.2. Obiekt zlokalizowany w pierzei, metoda zalewowa – widok z boku

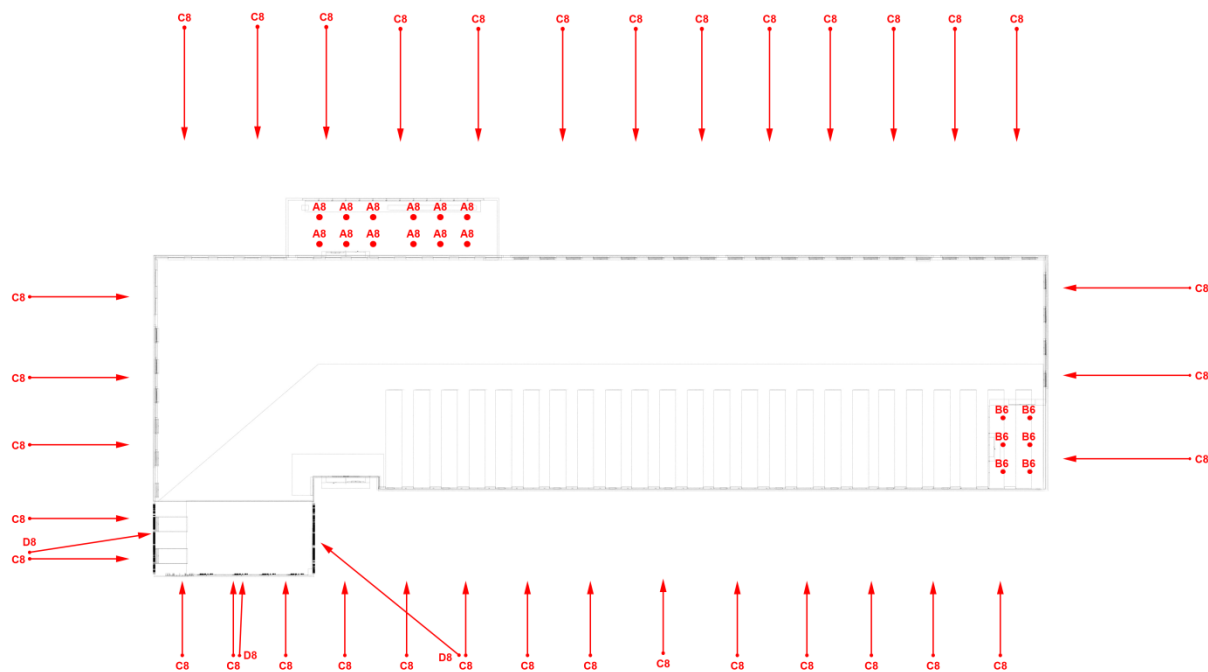


Rys. Z.D.3. Obiekt zlokalizowany w pierzei, metoda punktowa – widok z boku

Uwagi:

- w koncepcji punktowej oprawy typu B7 i C7 zamontowane na gzymsach, bez nachylenia,
- w koncepcji punktowej oprawy typu A7 są zamontowane w odległości 0,3m od obiektu.

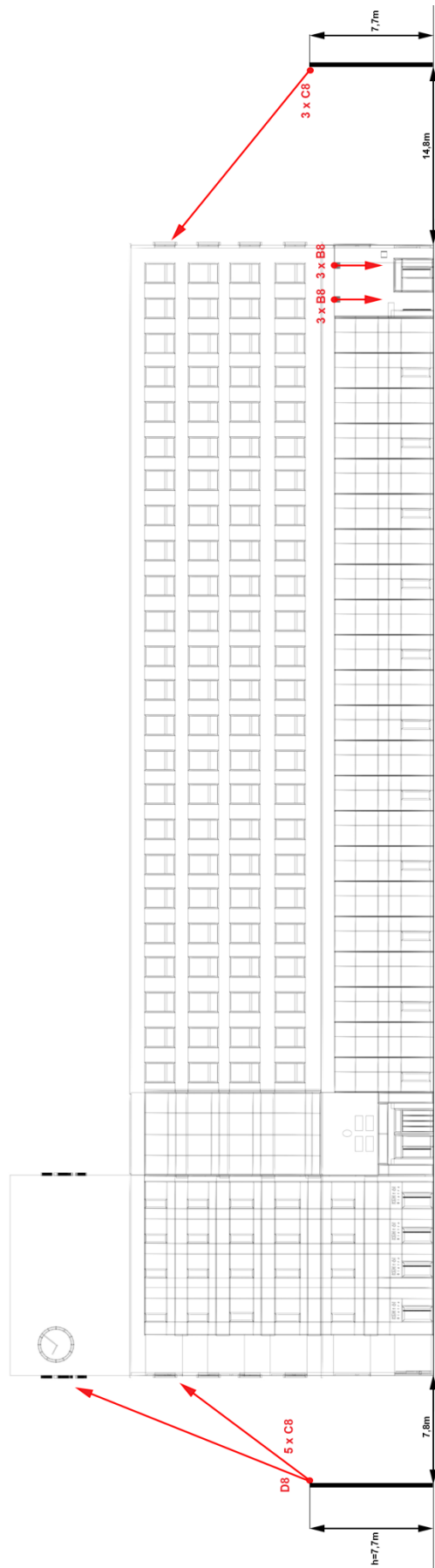
ZAŁĄCZNIK E: Schematyczne rozmieszczenie opraw oświetleniowych dwóch koncepcji projektu iluminacji obiektu nowoczesnego



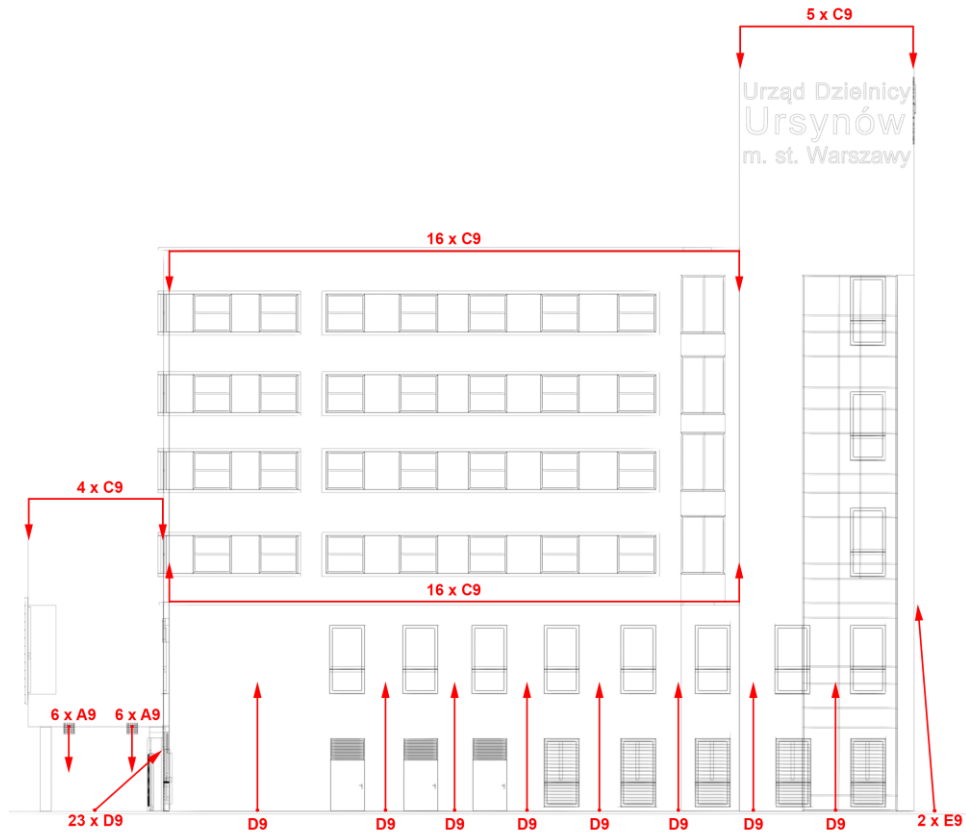
Rys. Z.E.1. Obiekt nowoczesny, metoda zalewowa – widok z góry



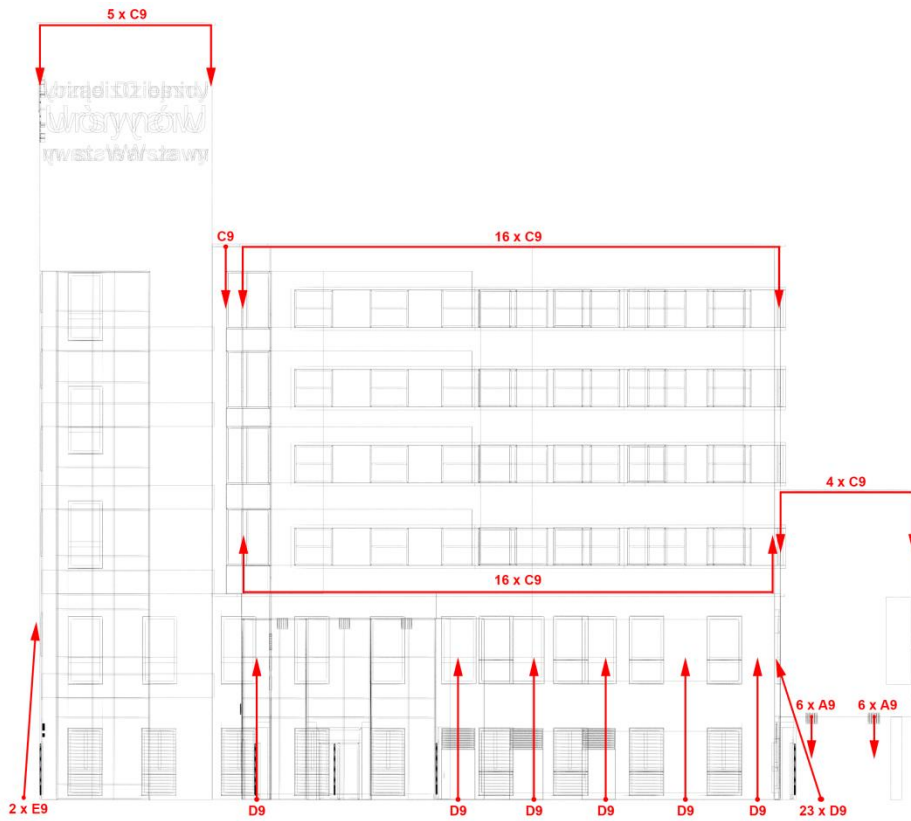
Rys. Z.E.2. Obiekt nowoczesny, metoda zalewowa – z boku 1



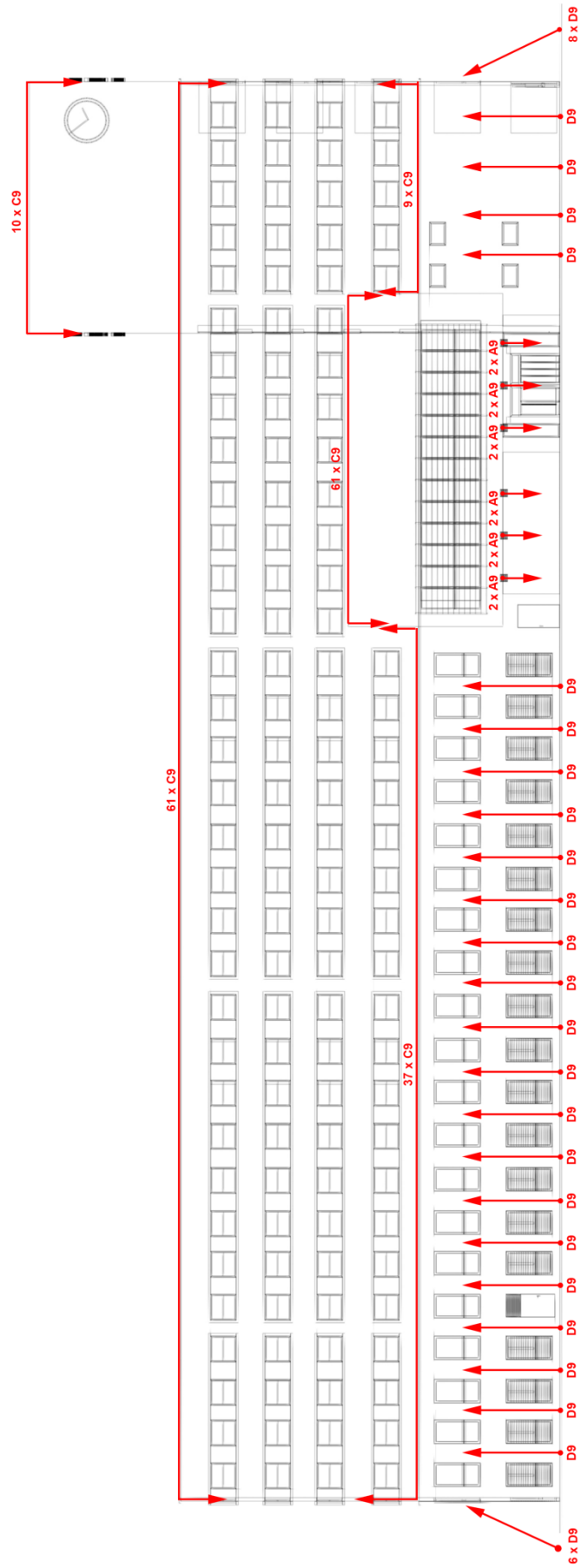
Rys. Z.E.3. Obiekt nowoczesny, metoda zalewowa – z boku 2



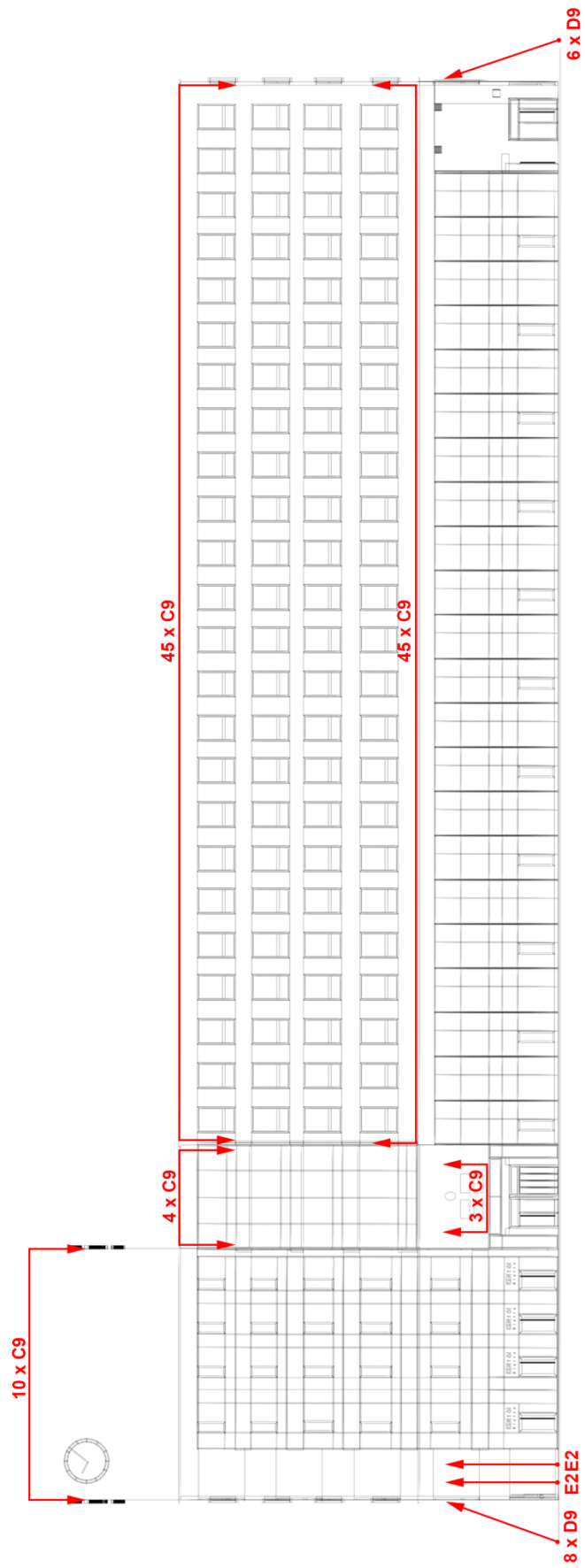
Rys. Z.E.4. Obiekt nowoczesny, metoda punktowa – widok z przodu



Rys. Z.E.5. Obiekt nowoczesny, metoda punktowa – widok z tyłu

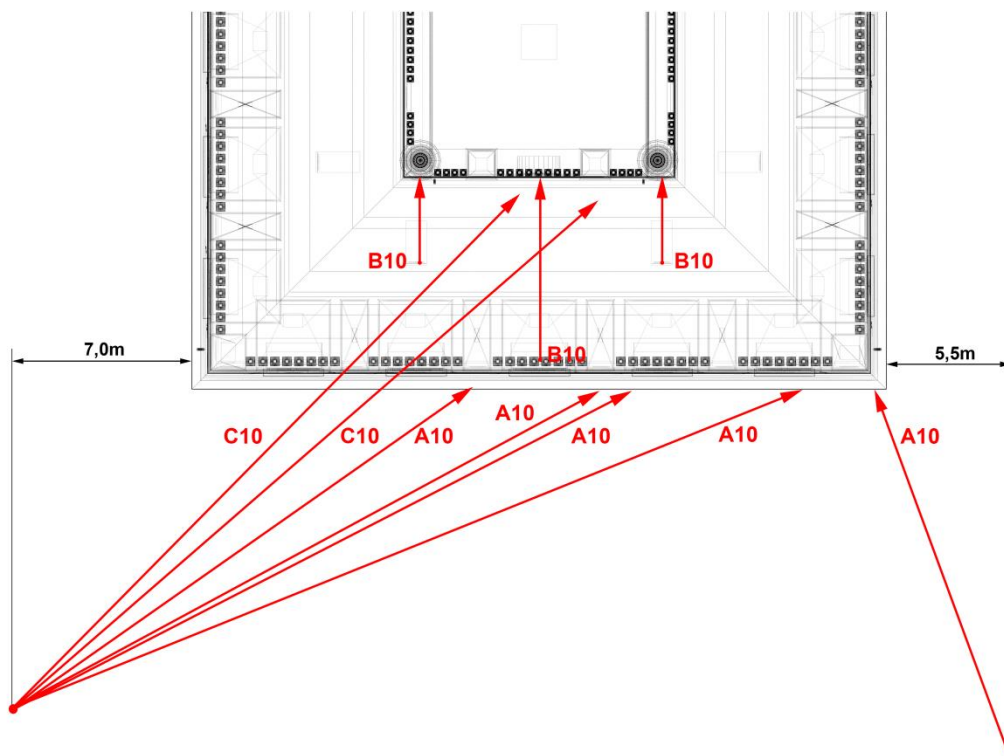


Rys. Z.E.6. Obiekt nowoczesny, metoda punktowa – widok z boku 1

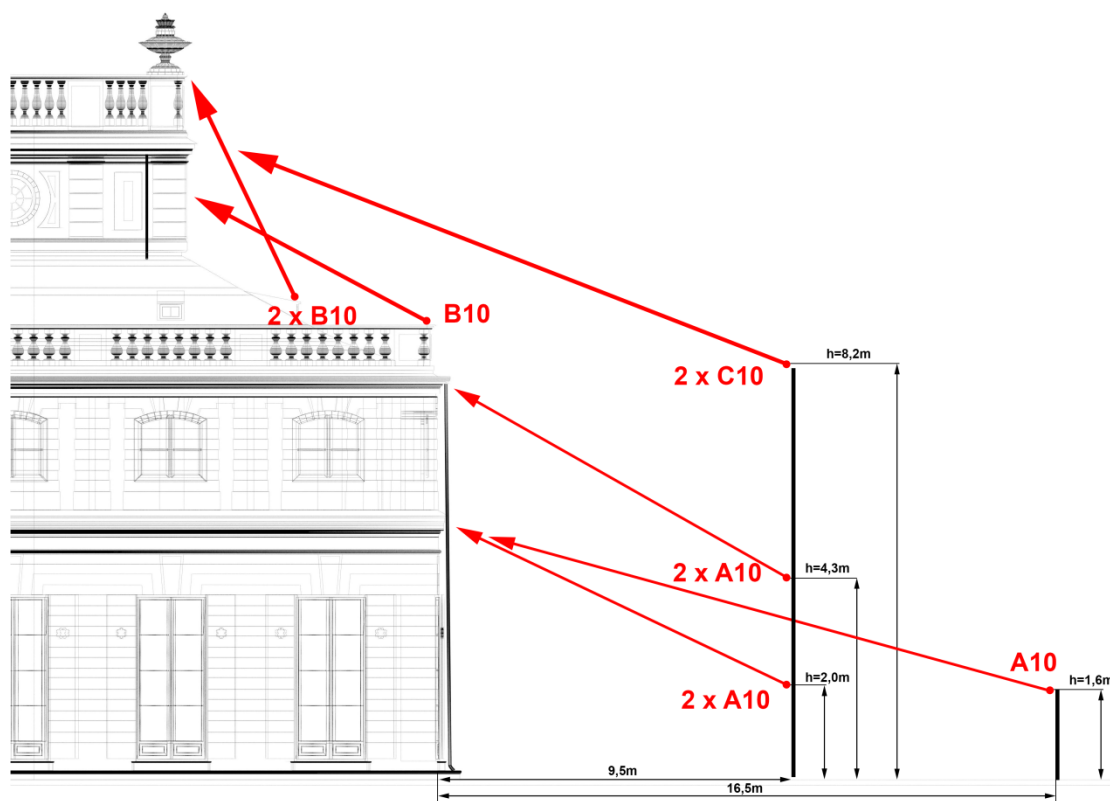


Rys. Z.E.7. Obiekt nowoczesny, metoda punktowa – widok z boku 2

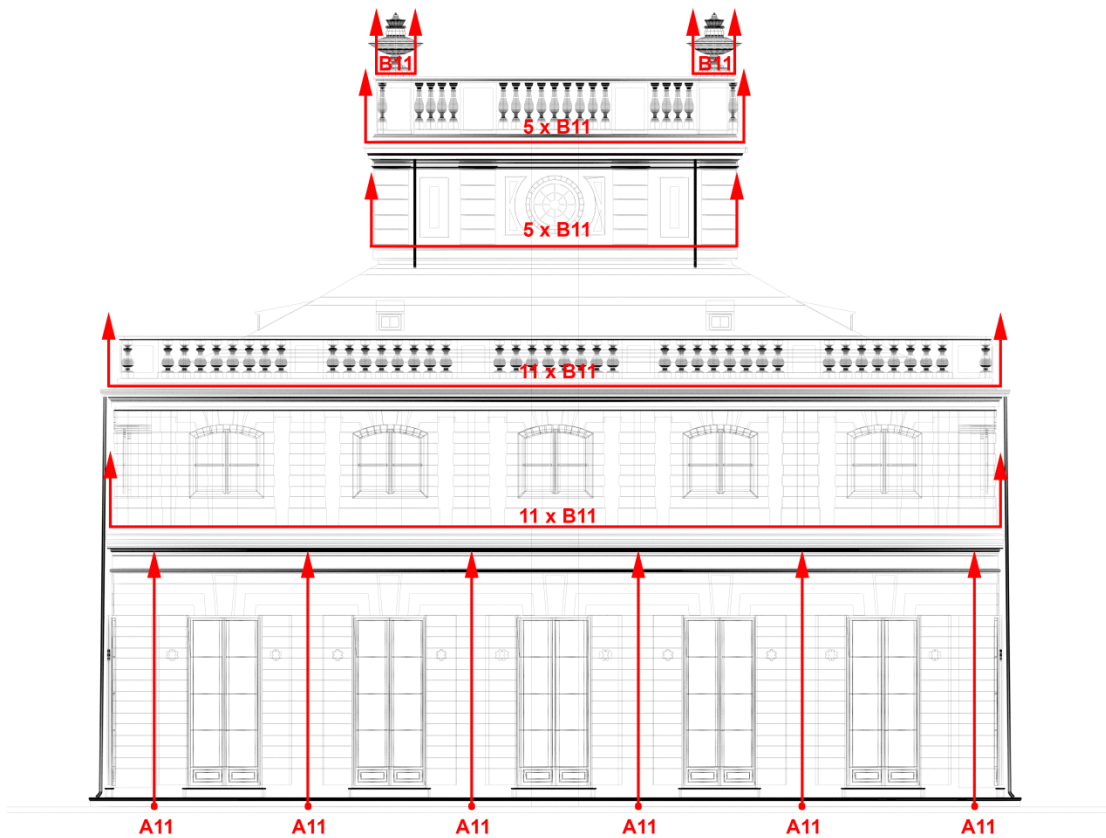
ZAŁĄCZNIK F: Schematyczne rozmieszczenie opraw oświetleniowych dwóch koncepcji projektu iluminacji Białego Domku



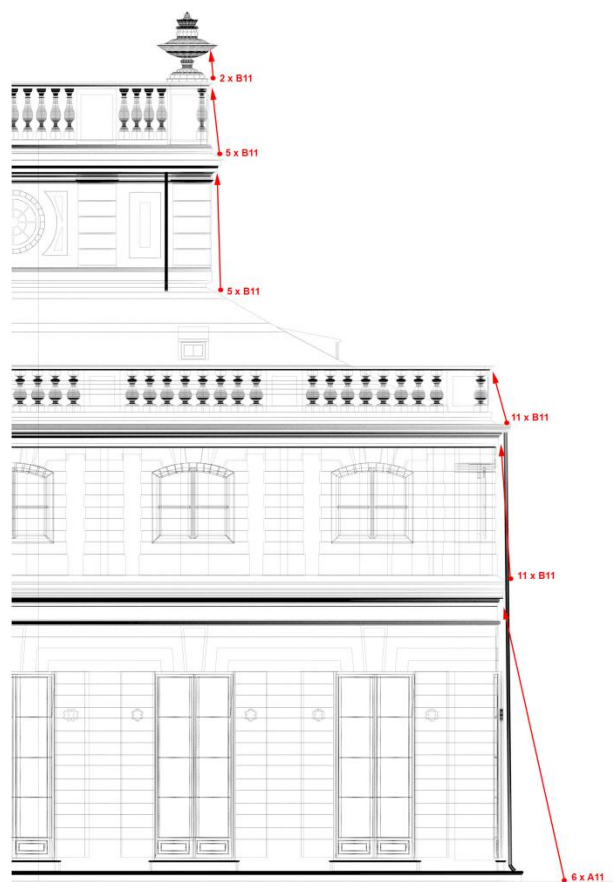
Rys. Z.F.1. Biały Domek, metoda zalewowa – widok z góry



Rys. Z.F.1. Biały Domek, metoda zalewowa – widok z boku



Rys. Z.F.3. Biały Domek, punktowa – widok od frontu



Rys. Z.F.4. Biały Domek, punktowa – widok z boku