

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

DYSCYPLINA NAUKOWA - INŻYNIERIA LĄDOWA, GEODEZJA I

TRANSPORT

DZIEDZINA NAUK - DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH

Rozprawa Doktorska

mgr inż. Tomasz Benedysiuk

**Instrumentalne metody oceny jakości powierzchni betonu,
ze szczególnym uwzględnieniem betonu architektonicznego**

Promotor

prof. dr hab. inż. Andrzej Garbacz

Promotor pomocniczy

dr inż. Wioletta Jackiewicz-Rek

WARSZAWA 2024

Podziękowania

Składam serdeczne podziękowania wszystkim, którzy wspierali mnie przez cały okres pisania niniejszej pracy.

Dziękuję promotorowi tej pracy, Panu Dziekanowi prof. dr hab. inż. Andrzejowi Garbaczowi, za wsparcie merytoryczne i inspiracje do zgłębiania zagadnień naukowych związanych z pracą.

Dziękuję promotorowi pomocniczemu, Pani Dziekan dr inż. Wioletcie Jackiewicz-Rek, która mnie wspierała od czasów pisania pracy magisterskiej i której wykład był inspiracją do rozpoczęcia prac omawianym zagadnieniem.

Dziękuję mojemu Tacie za nieodzowną pomoc w pracy nad konstrukcją urządzenia badawczego.

Dziękuję mojej Mamie za to, że zawsze mnie dopingowała w na drodze kariery naukowej i zawsze we mnie wierzyła.

Dziękuję mojej żonie Alicji, za codzienne wsparcie i za to, że zawsze była przy mnie.

Streszczenie

W niniejszej pracy przedstawiono nową, ilościową metodę oceny gładkiego betonu architektonicznego, która stanowi odpowiedź na rosnące zapotrzebowanie na obiektywne i powtarzalne narzędzia kontroli jakości w budownictwie. W odróżnieniu od metod opisanych w literaturze, koncentrujących się zazwyczaj na pojedynczych aspektach wizualnych, proponowane rozwiązanie umożliwia kompleksową ocenę estetyki betonu, uwzględniając jednocześnie dwa kluczowe parametry: porowatość i kolorystykę powierzchni.

W części teoretycznej pracy dokonano analizy specyfiki betonu architektonicznego jako materiału łączącego w sobie funkcje konstrukcyjne i estetyczne. Podkreślono mnogość czynników wpływających na ostateczny wygląd powierzchni, co często prowadzi do rozbieżności pomiędzy oczekiwaniami architekta a efektem końcowym. Wskazano również na problemy związane z subiektywnym charakterem dotychczas stosowanych metod oceny, opartych w dużej mierze na wizualnej ocenie ekspertów, co może prowadzić do sporów i konfliktów na linii architekt-wykonawca.

W odpowiedzi na te wyzwania, opracowano metodę badawczą, bazującą na analizie zdjęć powierzchni wykonanych w kontrolowanych, powtarzalnych warunkach oświetleniowych za pomocą metod komputerowej analizy obrazu. Proponowane warunki pomiarowe, w odróżnieniu od dotychczasowych metod, umożliwiają minimalizację wpływu czynników zewnętrznych na wyniki analizy, zapewniając obiektywizm i powtarzalność oceny.

W toku badań przeprowadzonych zarówno z wykorzystaniem próbek modelowych, jak i rzeczywistych powierzchni betonowych, przeanalizowano wpływ chropowatości i kolorystyki powierzchni na wyniki pomiaru porowatości, a także wpływ porowatości i chropowatości na postrzeganie koloru betonu.

Ponadto, w ramach pracy zaproponowano nowatorskie kryteria oceny porowatości i kolorystyki, a także określono wartości graniczne parametrów statystycznych dla każdej z zaproponowanych klas powierzchni, umożliwiając tym samym obiektywną klasyfikację gładkich powierzchni betonowych pod względem ich jakości wizualnej.

Opracowana metoda ma potencjał, aby stać się nie tylko użytecznym narzędziem oceny dla inżynierów i architektów, ale także przyczynić się do podniesienia standardów jakości gładkiego betonu architektonicznego.

Słowa kluczowe: beton architektoniczny, analiza obrazu, porowatość powierzchni, kolorystyka powierzchni

Abstract

The dissertation presents a novel, quantitative method for assessing the surface quality of architectural concrete, addressing the growing demand for objective and repeatable quality control tools in construction. Unlike methods described in the literature, which typically focus on individual visual aspects, the proposed solution enables a comprehensive assessment of concrete aesthetics, simultaneously considering two key parameters: surface porosity and its color.

The theoretical part of the dissertation analyzes the specificity of architectural concrete as a material combining structural and aesthetic functions. It highlights the multitude of factors influencing the final surface appearance, which often leads to discrepancies between the architect's expectations and the final outcome. It also points out the problems related to the subjective nature of currently used assessment methods, largely based on visual inspection by experts, which can lead to disputes and conflicts between architects and contractors.

In response to these challenges, a research method has been developed based on the analysis of surface images taken under controlled, repeatable lighting conditions using computer vision techniques. This standardized, repeatable measurement setup, unlike previous methods, minimizes the influence of external factors on the analysis results, ensuring objectivity and repeatability of the assessment.

The research, conducted using both model samples and real concrete surfaces, analyzed the influence of surface roughness and color on porosity measurements, as well as the impact of porosity and roughness on the perception of concrete color.

Furthermore, the dissertation proposes innovative criteria for assessing porosity and color and defines threshold values for statistical parameters for each proposed surface class. This enables objective classification of architectural concrete surfaces in terms of their visual quality.

The developed method has the potential to become not only a valuable assessment tool for engineers and architects but also to contribute to raising the quality standards of architectural concrete.

Keywords: architectural concrete, image analysis, surface porosity, surface color

Spis treści

Spis treści	7
CZĘŚĆ TEORETYCZNA	11
1. Wprowadzenie	11
1.1. Geneza tematu pracy	11
1.2. Cel pracy	13
2. Charakterystyka betonu architektonicznego	14
2.1. Definicja betonu architektonicznego	14
2.2. Cechy powierzchni betonu architektonicznego	20
2.3. Rodzaje betonu architektonicznego	29
2.3.1. Rodzaj końcowej obróbki powierzchni	29
2.3.2. Rodzaj i kształt użytego deskowania	32
2.3.3. Zastosowane składniki mieszanki betonowej	33
3. Ocena estetyki powierzchni betonu architektonicznego w ujęciu normowym	35
3.1. Powierzchnie odniesienia	37
3.2. Kryteria oceny porowatości powierzchniowej	40
3.3. Kryteria oceny płaskości powierzchni	44
3.4. Kryteria oceny zarysowań	46
3.5. Kryteria oceny różnic kolorystycznych	47
3.6. Kryteria oceny faktury	52
3.7. Ogólny wygląd powierzchni	54
3.8. Podsumowanie kryteriów oceny	55
4. Ilościowe metody oceny porowatości i kolorystyki powierzchni betonu	57
4.1. Metody oceny porowatości	57
4.1.1. Manualna ocena porowatości	57
4.1.2. Zautomatyzowana ocena porowatości	60
4.2. Metody oceny kolorystyki	61

5.	Czynniki wpływające na wizualną ocenę kolorystyki betonu	66
5.1.	Budowa ludzkiego oka	66
5.2.	Źródła oświetlenia	68
5.3.	Przestrzeń barw.....	70
5.4.	Obliczanie różnicy kolorystycznej	73
5.4.1.	Obliczanie różnic koloru w przestrzeni sRGB	73
5.4.2.	Obliczanie różnic koloru w przestrzeni CIELAB	74
6.	Metody komputerowej analizy obrazu i przetwarzania obrazów cyfrowych	76
6.1.	Przetwarzanie obrazów cyfrowych.....	76
6.2.	Operacje morfologiczne na obrazie	77
6.3.	Algorytmy progowania.....	80
	CZĘŚĆ PRAKTYCZNA.....	81
7.	Koncepcja badawcza.....	81
7.1.	Wstęp.....	81
7.2.	Plan badań.....	83
7.3.	Kryteria oceny wyników pomiaru	85
8.	Metody, techniki, narzędzia badawcze	87
8.1.	Urządzenie badawcze	87
8.2.	Program i metody badań.....	88
8.2.1.	Badanie porowatości powierzchniowej.....	88
8.2.1.1.	Algorytm pomiaru porowatości powierzchni	89
8.2.1.2.	Ocena porowatości powierzchniowej	90
8.2.1.3.	Opis programu badawczego oceny porowatości.....	91
8.2.2.	Badanie kolorystyki powierzchni.....	91
8.2.2.1.	Weryfikacja wstępnych założeń badania kolorystyki.....	92
8.2.2.2.	Algorytm korekcji kolorystyki zdjęcia	95
8.2.2.3.	Sposób obliczania podobieństwa kolorystycznego.....	96

8.2.2.4.	Ocena kolorystyki powierzchni	97
8.2.2.5.	Opis programu badawczego oceny kolorystyki	98
8.3.	Testy urządzenia badawczego	99
8.4.	Powierzchnie badawcze	100
9.	Badania modelowe	107
9.1.	Badania porowatości	107
9.1.1.	Wybór ogniskowej i algorytmu progowania lokalnego	107
9.1.2.	Dokładność i precyzja pomiaru porowatości	109
9.1.3.	Wpływ przebarwień na wynik pomiaru porowatości	117
9.1.4.	Wpływ chropowatości na wynik pomiaru porowatości	119
9.1.5.	Miara oceny porowatości	121
9.2.	Badania kolorystyki	125
9.2.1.	Oznaczenie dokładności i precyzji pomiaru na wzornikach koloru NCS	125
9.2.2.	Wpływ porowatości na wynik pomiaru kolorystyki	130
9.2.3.	Wpływ chropowatości na wynik pomiaru kolorystyki	133
9.2.4.	Wybór wariantu kalibracji kolorystycznej	136
9.2.5.	Miara oceny dominującego koloru powierzchni	137
9.2.6.	Miara oceny przebarwień powierzchniowych	139
10.	Badania walidacyjne	142
10.1.	Przebieg badań walidacyjnych	142
10.2.	Wyniki badań walidacyjnych - porowatość	148
10.2.1.	Poprawność klasyfikacji porów	148
10.2.2.	Wybór miar porowatości	150
10.2.3.	Wybór kryteriów oceny	153
10.3.	Wyniki badań walidacyjnych - kolorystyka	156
10.3.1.	Poprawność klasyfikacji koloru	156
10.3.2.	Sposób oceny dominującego koloru powierzchni	159

10.3.3.	Weryfikacja metody oceny przebarwień	161
10.3.4.	Wybór kryteriów oceny	163
11.	Procedura badawcza i kryteria oceny	165
11.1.	Procedura oceny porowatości	165
11.2.	Procedura oceny kolorystyki.....	166
12.	Podsumowanie	168
12.1.	Wnioski	168
12.2.	Plany na przyszłość	170
13.	Bibliografia.....	171

CZĘŚĆ TEORETYCZNA

1. Wprowadzenie

1.1. Geneza tematu pracy

Beton architektoniczny jako materiał łączący właściwości użytkowe z cechami estetycznymi jest trudnym tworzywem, prowadzącym do sytuacji spornych wśród inżynierów i architektów. Z jednej strony, materiał ten daje nowe możliwości kształtowania formy obiektu budowlanego oraz może wyeliminować konieczność poświęcania dodatkowego czasu na wykończenie estetyczne powierzchni, takie jak malowanie czy tynkowanie. Z drugiej jednak strony, wytworzenie powierzchni betonowej, o często założonych wysokich wymaganiach dotyczących między innymi kolorystyki i porowatości, stanowi niemałe wyzwanie inżynierskie, zwłaszcza w przypadku elementów wykonywanych na placu budowy.

W kwestii betonu architektonicznego wyzwaniem może być zarówno doskonalenie technik produkcyjnych jak i szukanie metod oceny powierzchni pod kątem estetycznym. Przede wszystkim należy zwrócić uwagę na trudności związane z obiektywną oceną estetyki elementów budowlanych. Powodem tego jest zarówno wielkość elementów, problemy z jednoznacznym określeniem cech powierzchni w specyfikacji betonu architektonicznego, a także trudność w znalezieniu metody oceny niezależnej od obserwatora. Pojawianie się niejednorodności powierzchni, które można uznać za naturalną cechę betonu [1, 2], wymusza ustalenie akceptowalnych odchyłek wyglądu powierzchni od założonego wzorca. Nie należy także zapomnieć o trudnościach technicznych, wysokich kosztach ewentualnych napraw powierzchni lub w skrajnym przypadku wyburzenia i wybudowania danego elementu na nowo [2]. Jako że elementy wykonane z betonu architektonicznego często stanowią część konstrukcji nośnej budynku, ewentualne powtórne ich wzniesienie wiąże się z opóźnieniami innych etapów budowy. Wszystkie wymienione aspekty stanowią podstawę konfliktu interesów na linii architekt-wykonawca, gdzie na jednej szali można położyć końcowy efekt estetyczny a na drugiej opóźnienia w harmonogramie i dodatkowe koszty poprawek. Sytuacja taka wymaga obiektywnej metody oceny powierzchni, najlepiej ilościowej, której wyników nie będą zakłócały ani warunki badania ani czynniki ludzkie. Brak jednoznacznych dokumentów normalizacyjnych dodatkowo utrudnia obiektywną ocenę betonu architektonicznego. W Polsce, w specyfikacjach często przywołuje się wytyczne niemieckie *DBV-Merkblatt Sichtbeton* [3] oraz opracowanie polskie [4], które definiują kryteria oceny. Wytyczne

te pozostawiają jednak pewne pole do interpretacji, gdyż część kryteriów oceniana jest w sposób jakościowy.

Aby wyeliminować nieporozumienia między architektami a wykonawcami, konieczne jest opracowanie jednoznacznej i wiarygodnej, ilościowej metody oceny właściwości estetycznych powierzchni betonu architektonicznego. Taka metoda powinna opierać się na jasno określonych kryteriach oceny wyżej wymienionych cech oraz na odpowiednich metodach badawczych.

Wcześniejsze prace autora, obejmujące pracę magisterską [5] i artykuł naukowy [6], wykorzystujące metody analizy obrazu stanowiły wstęp do niniejszych badań. W badaniach tych zastosowano autorskie urządzenie DARK-BOX umożliwiające wykonanie zdjęć powierzchni w kontrolowanych warunkach oświetleniowych. Biorąc pod uwagę wcześniejsze doświadczenia, na potrzebę niniejszej pracy dokonano istotnych zmian w urządzeniu obejmujących m.in.:

- dodanie stabilizatora napięcia pozwalającego na uzyskanie jednolitego natężenia światła niezależnie od poziomu naładowania akumulatora,
- wymianę aparatu na nowy model pozwalający na wykonywanie zdjęć o wyższej rozdzielczości i zredukowanym szumie cyfrowym,
- wycentrowanie osi aparatu w stosunku do lamp oświetlenia bocznego,
- poprawę warunków oświetleniowych poprzez instalację nowych lamp górnych i bocznych,
- dodanie uszczelki uniemożliwiającej przedostawanie się światła poprzez nierówności powierzchni.

Zgodnie z doświadczeniami autora z poprzednich prac, istotnymi kryteriami oceny powierzchni betonu architektonicznego są jego porowatość i jednorodność kolorystyczna.

W związku z powyższym w pracy postawiono następującą tezę:

możliwe jest opracowanie metody jednoczesnego ilościowego pomiaru porowatości i kolorystyki gładkiego betonu architektonicznego metodami analizy obrazu, stwarzając powtarzalne warunki oceny powierzchni, pomimo niejednorodnych warunków badania.

1.2. Cel pracy

Głównym celem pracy jest opracowanie i wykazanie skuteczności metody ilościowej oceny porowatości i kolorystyki powierzchni gładkiego betonu architektonicznego. Metoda ta powinna umożliwić obiektywną, powtarzalną i jednoznaczną ocenę estetyki powierzchni betonowych. Należy określić w jakim stopniu cechy powierzchni wpływają na wynik pomiaru kolorystyki i porowatości powierzchni, a także które parametry statystyczne najlepiej charakteryzują porowatość i kolorystykę powierzchni betonu architektonicznego. Ponadto w ramach pracy należy odpowiedzieć na pytanie jakie wartości graniczne wybranych parametrów statystycznych należy wybrać w celu przyporządkowania powierzchni do poszczególnych klas jakości.

Aby tego dokonać, w pierwszej kolejności planuje się przeanalizować definicje betonu architektonicznego obecne w literaturze, w celu przyjęcia jednej definicji terminu gładki beton architektoniczny. Przeanalizowane zostaną także rodzaje i cechy betonu architektonicznego oraz wykonany zostanie przegląd istniejących wytycznych i norm, co pozwoli na identyfikację najważniejszych czynników wpływających na wygląd powierzchni betonu, a także pozwoli na wybór parametrów oceny porowatości i kolorystyki powierzchni. Kolejnym krokiem będzie przeanalizowanie obecnego stanu wiedzy w zakresie badań wybranych cech powierzchni. Omówione zostaną także czynniki wpływające na wizualną ocenę kolorystyki betonu oraz metody komputerowej analizy obrazu i przetwarzania danych cyfrowych. Na tej podstawie, w części praktycznej zaproponowana zostanie metoda oceny kolorystyki i porowatości powierzchni. Skuteczność opracowanych metod zostanie sprawdzona pod kątem dokładności i precyzji pomiaru, sprawdzony zostanie także wpływ pozostałych cech powierzchni na wynik pomiaru. Zaproponowane zostaną ilościowe kryteria oceny powierzchni oparte na opracowanych metodach oceny. Badania zostaną wykonane na próbkach modelowych, które zapewniają kontrolę nad poszczególnymi parametrami powierzchni oraz na istniejących powierzchniach wykonanych z betonu architektonicznego.

2. Charakterystyka betonu architektonicznego

2.1. Definicja betonu architektonicznego

Określenie zakresu niniejszej pracy wymaga przede wszystkim zdefiniowania przedmiotu badań. W tym celu niezbędne jest przeanalizowanie dostępnych definicji betonu architektonicznego. W Tab. 2.1 przedstawiono zestawienie definicji betonu architektonicznego zaczerpniętych z różnorodnych źródeł, takich jak normy, wytyczne i publikacje naukowe.

Tab. 2.1. Zestawienie definicji betonu architektonicznego

Nr	Źródło definicji	Definicja
Normy, wytyczne i instrukcje		
1	ACI 303-97	Beton, który nie wymaga dalszej obróbki powierzchniowej po zdjęciu form, z wyjątkiem ewentualnych napraw [7].*
2	ACI 303R-12	Beton, który będzie na stałe wystawiony na widok i dlatego wymaga szczególnej staranności przy wyborze składników betonu, formowania, układania i wykańczania, aby uzyskać pożądaną wykład architektoniczny [8].*
3	ACI 301-05	Beton, który jest eksponowany jako powierzchnia wewnętrzna lub zewnętrzna w ukończonej konstrukcji i jest określony jako beton architektoniczny w dokumentach kontraktowych; przyczynia się do wizualnego charakteru konstrukcji i z tego powodu wymaga szczególnej staranności przy wyborze składników betonu, formowania, układania i wykańczania, aby uzyskać pożądaną wykład architektoniczny [9].*
4	ACI 301-16	Beton, który zazwyczaj jest wystawiony na widok, jest określony jako beton architektoniczny w dokumentach kontraktowych i z tego powodu wymaga staranności przy wyborze składników betonu formowania, układania i wykańczania, aby uzyskać pożądaną wykład architektoniczny [10].*
5	PCI - Architectural Precast Concrete	Termin beton architektoniczny prefabrykowany odnosi się do każdego prefabrykowanego elementu betonowego o określonym standardzie jednolitego wyglądu, szczegółów powierzchni, koloru i faktury. Posiada specjalny lub czasami standardowy kształt, który przez zastosowanie lub wykończenie, kształt, kolor lub fakturę przyczynia się do architektonicznej formy i finalnego wyglądu konstrukcji; elementy mogą być częścią konstrukcji lub niekonstrukcyjnej osłony, mogą być zbrojone lub sprężone [11].*
6	PTV 21-601	Beton lub zaprawa zgodnie z § 3.1 NBN B 15-001, która jest widoczna i której wygląd spełnia dodatkowe wymagania w stosunku do tych określonych w PTV 200 w zakresie wyglądu [12].*
7	DIN 18217	(Beton architektoniczny posiada - dop. autora) widoczne powierzchnie betonowe, dla których musi istnieć jednoznaczny i praktycznie wykonalny opis. Porównanie z wykonanymi budowlami może w tym przypadku stanowić skuteczną pomoc [13].*

8	DBV-Merkblatt Sichtbeton	Powierzchnia betonu architektonicznego to część betonu widoczna po zakończeniu, która pozwala rozpoznać cechy projektowania i wykonania (kształt, faktura, kolor, rodzaj szalunku, fugi itp.) i która decyduje o architektonicznym efekcie elementu konstrukcyjnego lub budowli. Powierzchnie widoczne mogą być różnorodnie kształtowane poprzez zastosowanie specjalnych form i celowej kompozycji betonu lub obróbki zgodnie z DIN 18500 „Beton architektoniczny, terminologia, wymagania, badania, nadzór”. Powierzchnie widoczne muszą być odpowiednio opisane w specyfikacji technicznej. Samo żądanie w opisie „betonu architektonicznego” nie jest wystarczające [3].*
Książki i artykuły naukowe		
9	Kuniczuk K.	Beton specjalnie projektowany na etapie tworzenia dokumentacji, w której określone są wymagania odnośnie do jego powierzchni oraz w wyniku ekspozycji wpływa on na wizualny charakter obiektu [4].
10	Jackiewicz-Rek W., Woyciechowski P.	Beton architektoniczny (...) to widoczna powierzchnia betonowa, która nie podlega wykończeniu powłokami kryjącymi. Poszycie deskowania, projekt mieszanki betonowej oraz rodzaj pielęgnacji i obróbki umożliwiają dowolne kształtowanie powierzchni i faktury betonu [14].
11	Silva et al.	Beton architektoniczny jest tutaj zdefiniowany jako każdy beton używany do zewnętrznego lub wewnętrznego poprawienia lub wykończenia budynku lub konstrukcji, bez żadnych powłok poza farbą lub lakierem po demontażu deskowania. Beton architektoniczny różni się od betonu konstrukcyjnego głównie tym, że wygląd i kolor jego ekspozycyjnych powierzchni są ważniejsze niż wytrzymałość materiału [15].*
12	Lopez A., Sarli A.	Beton architektoniczny to materiał kompozytowy, który oprócz szerokiego zakresu odporności mechanicznej i trwałości, wyróżnia się estetyczną wartością powierzchni, którą zapewnia jego kolor i faktura [16].*
13	Malara J., Szafraniec J.	Beton architektoniczny należy rozumieć jako każdy rodzaj powierzchni, dla której mieszanka betonowa jest warstwą wykończeniową. Beton architektoniczny może również pełnić funkcje konstrukcyjne [17].

* w przypadku obcojęzycznych źródeł - tłumaczenie zgodne z najlepszą wiedzą autora pracy

Analizując zebrane definicje, można zauważyć, że beton architektoniczny definiowany jest na wiele sposobów. Szczególnie bogate źródło stanowią amerykańskie wytyczne ACI. Należy jednak pamiętać, że poszczególne definicje różnią się między sobą w zależności od przeznaczenia.

Chcąc omówić przytoczone wcześniej definicje należy przede wszystkim rozróżnić definicje podawane w oficjalnych dokumentach (definicje nr 1 ÷ 8), oraz te pochodzące z pozostałych publikacji, których autorzy mieli większą swobodę w definiowaniu betonu architektonicznego (definicje nr 9 ÷ 13).

W celu dokonania pogłębionej analizy porównawczej przytoczonych definicji, rozpatrzono je pod kątem pięciu aspektów, które najczęściej pojawiały się w przytoczonych definicjach:

- materiał,
- miejsce wbudowania,
- dopuszczalność krycia,
- specjalne wymagania dotyczące powierzchni,
- obróbka powierzchni.

W Tab. 2.2 przedstawiono zestawienie fragmentów omawianych definicji, uwzględniając wymienione aspekty.

Tab. 2.2. Zestawienie fragmentów wybranych definicji betonu z podziałem na poruszane aspekty

Nr	Źródło definicji	Materiał	Miejsce wbudowania	Dopuszczalność krycia	Specjalne wymagania dotyczące powierzchni	Obróbka powierzchni
Normy, wytyczne i instrukcje						
1	ACI 303-97	-	-	-	-	nie wymaga dalszej obróbki powierzchniowej po zdjęciu form, z wyjątkiem ewentualnych napraw
2	ACI 303R-12	beton; wymaga szczególnej staranności przy wyborze składników betonu	-	-	-	wymaga szczególnej staranności przy wyborze (..) wykańczania, aby uzyskać pożądany wygląd architektoniczny
3	ACI 301-05	beton; wymaga szczególnej staranności przy wyborze składników betonu	powierzchnia wewnętrzna lub zewnętrzna	beton, który jest ekspozowany	określony jako beton architektoniczny w dokumentach kontraktowych	wymaga szczególnej staranności przy wyborze (..) wykańczania, aby uzyskać pożądany wygląd architektoniczny

4	ACI 301-16	beton; wymaga staranności przy wyborze składników betonu	-	beton, który zazwyczaj jest wystawiony na widok	określony jako beton architektoniczny w dokumentach kontraktowych	wymaga staranności przy wyborze (..) wykańczania, aby uzyskać pożądaną wykład architektoniczny
5	PCI - Architectural Precast Concrete	beton; mogą być zbrojone lub sprężone	elementy mogą być częścią konstrukcji lub niekonstrukcyjnej osłony	-	określonym standardzie jednolitego wyglądu, szczegółów powierzchni, koloru i faktury	-
6	PTV 21-601	beton lub zaprawa zgodnie z § 3.1 NBN B 15-001	-	która jest widoczna	wygląd spełnia dodatkowe wymagania w stosunku do tych określonych w PTV 200 w zakresie wyglądu.	-
7	DIN 18217	powierzchnie betonowe	-	widoczne powierzchnie betonowe	dla których musi istnieć jednoznaczny i praktycznie wykonalny opis	-
8	DBV-Merkblatt Sichtbeton	beton	-	decydujący sposób decyduje o efekcie architektonicznym elementu lub budynku	powierzchnie można projektować (...) poprzez zastosowanie specjalnych szalunków i docelowego składu betonu	obróbka zgodnie z normą DIN 1850
Książki i artykuły naukowe						
9	Kuniczuk K.	beton	-	w wyniku eksponowania wpływa on na wizualny charakter obiektu	specjalnie projektowany (...) określone są wymagania odnośnie do jego powierzchni	-

10	Jackiewicz -Rek W., Woyciecho wski P.	powierzchnia betonowa	-	nie podlega wykończeniu powłokami kryjącymi	-	poszycie deskowania, projekt mieszanki betonowej oraz rodzaj pielęgnacji i obróbki umożliwiają dowolne kształtowanie powierzchni i faktury betonu
11	Silva et al.	każdy beton używany do (...)	do zewnątrznego lub wewnętrznego poprawienia lub wykończenia budynku lub konstrukcji	bez żadnych powłok poza farbą lub lakierem,	-	-
12	Lopez A., Sarli A.	material kompozytowy	-	-	estetyczną wartością powierzchni, którą zapewnia jego kolor i faktura	-
13	Malara J., Szafraniec J.	każdy rodzaj powierzchni, dla której mieszanka betonowa jest warstwą wykończenio- wą	-	mieszanka betonowa jest warstwą wykończenio- wą	-	-

Material

W wielu przypadkach, autorzy definicji zawartych w oficjalnych dokumentach, w kontekście materiału podkreślają konieczność staranności przy wyborze składników betonu (definicje nr 3 ÷ 5) spełnienia określonych norm (definicja nr 6).

W publikacjach książkowych oraz artykułach naukowych materiał jest definiowany niejednokrotnie mniej precyzyjnie. Przykładowo w definicji nr 12 użyto określenia *composite material*, co jest określeniem bardziej ogólnym niż beton. Dodatkowo, według definicji 13

beton jest wymagany jedynie jako warstwa wykończeniowa danego elementu, co prawdopodobnie ma podkreślać istotność warstwy przypowierzchniowej w ocenie jakości powierzchni betonu architektonicznego.

Miejsce wbudowania

W większości analizowanych definicji zawartych w normach nie zdefiniowano miejsca wbudowania betonu architektonicznego, a w tych, w których poruszono ten aspekt wskazuje się na brak ograniczeń w stosowaniu tego typu betonu: *powierzchnia wewnętrzna lub zewnętrzna* (definicja nr 3), czy *elementy mogą być częścią konstrukcji lub niekonstrukcyjnej osłony* (definicja nr 5).

Podobnie sytuacja ma się w publikacjach książkowych oraz artykułach naukowych, gdzie tylko w definicji nr 11 wspomniano o miejscu wbudowania wskazując na jego uniwersalność: *do zewnętrznego lub wewnętrznego poprawienia lub wykończenia budynku lub konstrukcji*.

Dopuszczalność krycia

Biorąc pod uwagę dopuszczalność krycia powierzchni, we wszystkich definicjach zawartych w oficjalnych dokumentach opisano, że powierzchnia betonu ma być widoczna dla odbiorcy. W definicji nr 8 zwrócono ponadto uwagę na istotną rolę wyglądu powierzchni betonu dla oceny estetyki elementu: *w decydujący sposób decyduje o efekcie architektonicznym elementu lub budynku*. W definicjach zawartych w oficjalnych dokumentach brakuje wzmianki o dopuszczalności stosowania ewentualnych powłok, choć użycie takich terminów jak *widoczne powierzchnie betonowe* czy *beton, który jest eksponowany* (definicje 3, 4, 6, 7, 8) może świadczyć o tym, że intencją autorów było unikanie stosowania widocznych dla odbiorcy warstw kryjących.

W tym kontekście należy wspomnieć dwie definicje zawarte w artykułach naukowych, gdzie w definicji nr 10, wprost nie dopuszczono przykrywania powierzchni betonu architektonicznego kolejnymi warstwami. Autorzy definicji nr 11 dopuszczają stosowanie farb lub lakierów na powierzchni betonu architektonicznego.

Specjalne wymagania dotyczące powierzchni

W większości przeanalizowanych definicji zawartych w oficjalnych dokumentach, wskazano na konieczność spełnienia szczególnych wymogów określonych w kontrakcie lub normie przez beton architektoniczny (definicje 3 ÷ 7).

Wśród definicji zawartych w artykułach warto zwrócić uwagę na definicję nr 12, gdzie podkreślono istotną rolę koloru i faktury powierzchni w zapewnieniu jej estetycznej wartości.

Obróbka powierzchni

W instrukcji ACI 303-97 zdefiniowano beton architektoniczny *jako niewymagający dalszej obróbki powierzchniowej po zdjęciu form*. W pozostałych definicjach, w tym w nowszej wersji ACI 303R-12, wprost dopuszczono obróbkę powierzchni w celu uzyskania pożądanego efektu (definicje 2, 3, 4, 8) bądź nie porusza się tego zagadnienia. Ponadto, w definicji nr 10 zaznaczono, że obróbki umożliwiają dowolne kształtowanie powierzchni i faktury betonu.

Podsumowując omawiane definicje betonu architektonicznego, należy zauważyć, że wspólną cechą wszystkich definicji jest wskazanie estetyki powierzchni betonu jako istotnego aspektu definiującego użyteczność tego materiału. Ważną kwestią jest także widoczność danego elementu dla użytkownika oraz stawianie specjalnych wymogów powierzchni.

Biorąc pod uwagę wymienione kwestie, beton architektoniczny można rozumieć jako *beton stanowiący część struktury budynku lub jego okładzina, nie podlegająca kryciu innymi powłokami niż bezbarwne, co do której przedstawiono wymagania dotyczące parametrów wpływających na estetykę powierzchni*.

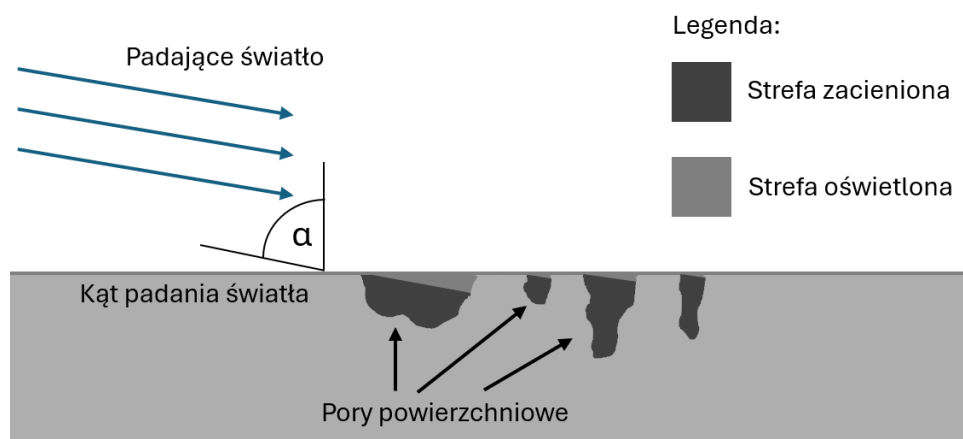
Przedmiotem badań podjętych w pracy będzie beton architektoniczny gładki, rozumiany przez autora pracy jako *beton architektoniczny którego struktura geometryczna charakteryzuje się stosunkowo małą chropowatością wynikającą z zastosowanego deskowania*.

2.2. Cechy powierzchni betonu architektonicznego

W celu poprawnego zaprojektowania metody oceny powierzchni betonu, należy najpierw określić cechy, które są istotne w odbiorze wizualnym. W podrozdziale opisano, wybrane przez autora jako najistotniejsze, cechy powierzchni betonu architektonicznego oraz przedstawiono istniejące miary stosowane do ich oceny.

Porowatość

Jedną z istotniejszych cech powierzchni betonu architektonicznego, determinującą w dużej mierze jego walory estetyczne, jest obecność tzw. pustek powietrznych (ang. *air voids*), określanych w literaturze również jako *bugholes*, *blowholes*, *surface bubbles*, czy *pory powierzchniowe* [2, 18, 19, 20]. Pustki te, definiowane są jako *małe, regularne lub nieregularne ubytki, zwykle o średnicy nieprzekraczającej 15 mm, powstałe w wyniku uwięzienia pęcherzyków powietrza na powierzchni uformowanego betonu podczas układania i zagęszczania* [18]. Na ostateczny efekt wizualny, jaki tworzą pory na powierzchni betonu, wpływ mają przede wszystkim ich rozmiar, rozmieszczenie oraz głębokość. Wymienione cechy pustek wpływają na sposób zachowania się światła na powierzchni betonowej, które tworzy zacienione obszary mające wpływ na postrzeganą kolorystykę powierzchni. Na Rys. 2.1 pokazano schematycznie sposób powstawania cieni na powierzchni betonu spowodowany porami powierzchniowymi.



Rys. 2.1. Efekt światłocienia na przykładzie porów powierzchniowych

Do najczęściej używanych parametrów charakteryzujących porowatość powierzchni betonu architektonicznego należą [2, 18, 19, 20]:

- **udział procentowy powierzchni porów:** wyrażony jako procent całkowitej powierzchni jaką zajmują widoczne pory; im wyższa wartość tego parametru, tym bardziej porowata jest analizowana powierzchnia,
- **rozkład wielkości porów:** wyrażony jako procentowa zawartość porów o określonych średnicach na badanej powierzchni; pozwala na bardziej szczegółową analizę niż sam udział procentowy porów,

- **maksymalna średnica porów:** określenie maksymalnej średnicy porów na powierzchni umożliwia identyfikację potencjalnych defektów, np. nadmiernie dużych ubytków, które mogłyby negatywnie wpłynąć na estetykę betonu.

Zarysowania

Istotny wpływ na estetykę powierzchni betonu architektonicznego mają również rysy. Zgodnie z definicją, zarysowanie to *całkowite lub niepełne rozdzielenie betonu lub muru na dwie lub więcej części powstałych przez łamanie lub pękanie* [21]. Powstawanie rys w betonie jest zjawiskiem naturalnym, wynikającym z jego właściwości mechanicznych, takich jak skurcz czy naprężenia wewnętrzne.

W kontekście oceny wizualnej powierzchni betonu, kluczowe jest rozróżnienie pomiędzy rysami niekonstrukcyjnymi, mającymi znaczenie przede wszystkim estetyczne a konstrukcyjnymi, które poza estetyką mogą wpływać na nośność i bezpieczeństwo konstrukcji. Metody oceny rys mają zastosowanie głównie w kontekście wpływu na konstrukcję budowli, ale mogą być również implementowane do oceny estetycznej betonu architektonicznego:

- **szerokość rozwarcia rys:** standardowym parametrem stosowanym do opisu rys jest szerokość rozwarcia [22, 23]. Parametr ten poza zastosowaniem w ocenie stanu technicznego budowli, może również wpływać na jej odbiór pod kątem estetycznym.
- **długość rys:** wraz z szerokością rozwarcia rys może być podstawą do obliczenia udziału procentowego powierzchni rys [24],
- **gęstość rys:** parametr ten określający liczbę rys przypadającą na jednostkę powierzchni. Mała gęstość rys może wskazywać na powierzchnię jednolitą i pozbawioną widocznych rys,
- **pole powierzchni rys:** parametr określający procent całkowitej powierzchni betonu zajmowany przez rysy. Umożliwia to bardziej precyzyjną ocenę „skali zarysowania” powierzchni w zakresie estetyki niż sama gęstość rys.

Faktura

Pojęcie faktury, mimo iż powszechnie stosowane w odniesieniu do betonu architektonicznego, może stwarzać problemy interpretacyjne w opisie i analizie powierzchni betonowych. Brak jednoznacznej definicji tego terminu w literaturze przedmiotu prowadzić może do trudności w opisie i analizie właściwości estetycznych powierzchni betonowych.

American Concrete Institute (ACI), definiując fakturę, odwołuje się do dwóch aspektów. Z jednej strony definiuje fakturę powierzchni (*surface texture*) jako *stopień chropowatości lub nieregularności zewnętrznych powierzchni cząstek kruszywa, a także stwardniałego betonu* [21], akcentując tym samym aspekt tekstury powierzchni. Z drugiej strony, w tej samej publikacji termin faktura (*texture*) definiowany jest jako *wzór lub konfiguracja widoczna na odsłoniętej powierzchni, obejmująca chropowatość, smugowanie, prążkowanie lub odchylenie od płaskości* [21]. Ta definicja ma szerszy charakter, obejmujący większe spektrum cech wizualnych powierzchni.

W niemieckich wytycznych DBV - Merkblatt Sichtbeton (08/2004) [3] zdefiniowano fakturę jako *geometryczny kształt powierzchni betonu rozumiany jako odchylenie od płaszczyzny*, podobnie jak druga w kolejności z przytoczonych definicji ACI.

K. Kuniczuk, definiując fakturę, kładzie nacisk na proces powstawania powierzchni, opisując ją jako *charakterystyczną powierzchnię przedmiotu zależną od właściwości tworzywa, sposobu obróbki i zastosowanych narzędzi* [4].

Analiza przytoczonych definicji wskazuje na brak jednoznacznego wyjaśnienia pojęcia faktury w odniesieniu do betonu architektonicznego.

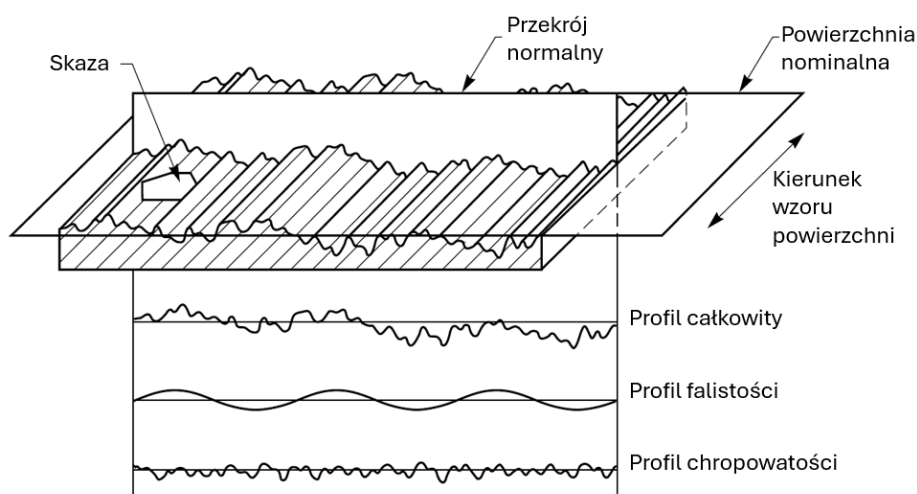
Do jakościowego opisu faktury powierzchni stosuje się różne pojęcia takie jak gładka, jednorodna zamknięta, szorstka czy chropowata [3, 4, 14, 25, 26, 27].

Termin chropowatość w kontekście inżynierii powierzchni jest także używany w ujęciu ilościowym (Norma ISO 4287 [28], ISO 25178 [29]). Zgodnie z normą ISO 4287 profil całkowity można filtrować otrzymując profile falistości i chropowatości.

Falistość definiuje się jako *zbiór nierówności będący składową powierzchni rzeczywistej o charakterze przypadkowym lub zbliżonym do postaci okresowej, których odstępów znacznie przewyższają odstępów chropowatości powierzchni* [30]. W przypadku falistości odstępów między wierzchołkami wypukłości (grzbietami) a punktami najniższymi wklęsłości (doliny) są znacznie większe niż w przypadku chropowatości (por. Rys. 2.2). Falistość powierzchni betonu

może mieć charakter przypadkowy lub wykazywać pewną powtarzalność, w zależności od technologii wykonania.

W odróżnieniu od falistości, która odnosi się do bardziej rozległych i regularnych wzniesień i zagłębień, chropowatość opisuje mikronierówności powierzchni. Chropowatość jest definiowana jako *cecha powierzchni, reprezentująca jej nieregularności (wypukłości i wklęsłości), których wysokość/głębokość jest co najmniej jednego rzędu wielkości mniejsza niż wymiar elementu* [31]. Reprezentuje ona składowe o wysokiej częstotliwości lub krótkiej długości fali, zgodnie z Rys. 2.2.



Rys. 2.2. Chropowatość i falistość powierzchni [32]

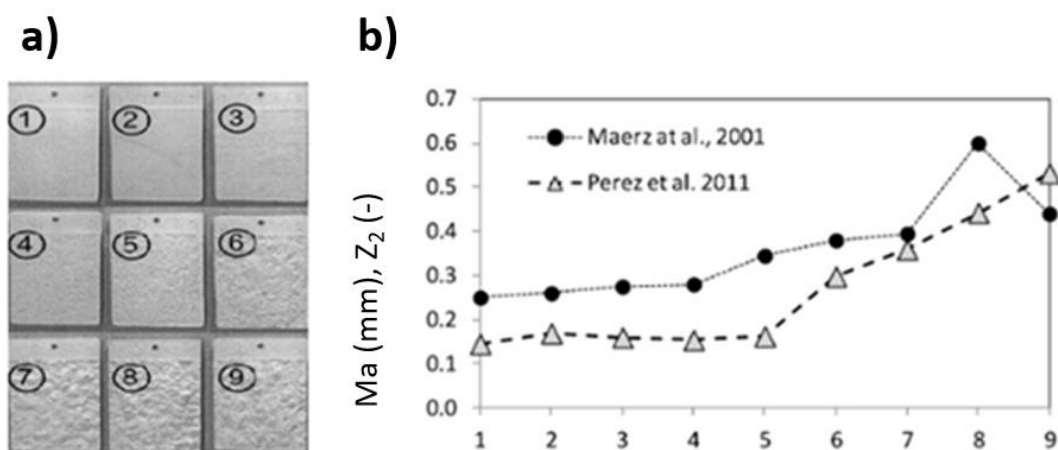
Parametry struktury geometrycznej powierzchni można uzyskać poprzez analizę profilu 2D (opisane m.in. w normie ISO 4287 [28]) lub obrazu trójwymiarowego (ISO 25178 [29]).

Tab. 2.3. Parametry amplitudowe struktury geometrycznej powierzchni według normy ISO 4287 oraz ISO 25178

Parametr	Nazwa parametru 2D (ISO 4287)	Nazwa parametru 3D (ISO 25178)
średnie arytmetyczne odchylenie profilu/powierzchni	$Pa/Wa/Ra$	Sa
średnie kwadratowe odchylenie profilu/powierzchni	$Pq/Wq/Rq$	Sq
skośność rozkładu wysokości	$Psk/Wsk/Rsk$	Ssk
kurtoza rozkładu wysokości	$Pku/Wku/Rku$	Sku
maksymalna wysokość wzniesień	$Pp/Wp/Rp$	Sp
maksymalna głębokość dolin	$Pv/Wv/Rv$	Sv
maksymalna wysokość chropowatości	$Pz/Wz/Rz$	Sz

Todhunter et al. [33] wykazali na podstawie swoich badań, że najpopularniejszą miarą chropowatości stosowaną w przemyśle jest wartość średnia Ra (średnie arytmetyczne odchylenie profilu) w przypadku posługiwania się normą ISO 4287 [28] oraz Sa (średnie arytmetyczne odchylenie powierzchni) w przypadku normy ISO 25178 [29].

Istotnym aspektem w badaniach nad fakturą powierzchni betonowych jest obiektywizacja jej oceny. Jednym ze sposobów oceny struktury geometrycznej powierzchni betonu jest wykorzystywanie płytek wzorcowych ICRI (International Concrete Repair Institute). Zestaw ten składa się z płytek z odwzorowaną strukturą geometryczną powierzchni betonu po najczęściej stosowanych obróbkach mechanicznych jego powierzchni (Rys. 2.3 a). Mimo iż płytki ICRI znajdują szerokie zastosowanie w ocenie faktury powierzchni, badania empiryczne przeprowadzone za pomocą profilometrów optycznych [34] wskazują na brak bezpośredniej zależności między chropowatością a wizualną oceną faktury powierzchni o chropowatości zbliżonej do charakterystycznej dla gładkich betonów architektonicznych (Rys. 2.3 b).



Rys. 2.3. (a) Płytki wzorcowe ICRI; (b) Parametry amplitudowe poszczególnych płytek wzorcowych (według [34]); Ma (Perez et al.) - średnie arytmetyczne odchylenie profilu - analogicznie do Ra według ISO 4287; Z₂ (Maerz et al.) - średnie nachylenie profilu

Ponadto, różni autorzy badali gładkie powierzchnie betonu określając strukturę geometryczną powierzchni za pomocą parametru S_a [35, 36, 37, 38, 39, 40].

Tab. 2.4. Porównanie wartości parametru S_a dla gładkich powierzchni betonowych uzyskanych różnymi metodami pomiarowymi

Autorzy pracy, rok	Wartość parametru S_a	Mierzona powierzchnia	Metoda badawcza	Urządzenie	Uwagi
Muszyński Z., Wyjadłowski M. 2020	bez filtrowania kształtu: 142 μm	standardowa „bardzo gładka” powierzchnia ściany betonowej	fotogrametria wielkoobszarowa	aparat Nikon D800 z obiektywem 50 mm	
Muszyński Z., Wyjadłowski M., 2020	bez filtrowania kształtu: 510 μm	standardowa „bardzo gładka” powierzchnia ściany betonowej	skanowanie laserowe (TLS)	skaner Leica ScanStation C10	
Muszyński Z., Wyjadłowski M., Kujawa P., 2021	~1500 μm	powierzchnia betonowa po rozformowaniu	skanowanie laserowe (TLS)	skaner Riegl VZ-400i	mierzone wraz z łączeniem płyt szalunkowych

Schabowicz K., Wójcicka-Migasiuk D., Urzędowski A., Wróblewski K., 2021	próbka A1: 61,75 μm próbka A2: 78,23 μm	próbka betonowa	profilometria optyczna	profilometr optyczny InfiniteFocus G5 firmy Bruker Alicone	pory powierzchniowe brane pod uwagę
Sadowski Ł., Czarnecki S., Hoła J., 2016	próbka 1.2: 123 μm próbka 2.2: 157 μm próbka 2.2: 117 μm	próbka betonowa	modyfikacja metody triangulacji liniowej	skaner 3D oparty na inteligentnej kamerze VC-3D	
Czarnecki S., Sadowski Ł., 2022	deskowanie drewniane: ~80 μm deskowanie OSB: ~110 μm deskowanie stalowe: ~70 μm deskowanie plastikowe: ~60 μm	próbki betonowe	modyfikacja metody triangulacji liniowej	skaner 3D oparty na inteligentnej kamerze VC-3D	pory powierzchniowe brane pod uwagę
Bermudez Bagniewski A., 2018	deskowanie drewniane: 23,93 μm deskowanie plastikowe: 11,73 μm	próbki betonowe	wielokrotna triangulacja oparta na czujnikach przemieszczenia	mikroskop cyfrowy 3D Keyence VR 3100	

Analizując wyniki pomiarów można zauważyć znaczną rozbieżność wartości parametru S_a (od 11,73 do ok. 1500). Różnice te mogą wynikać z kilku czynników, takich jak zróżnicowana dokładność czy zasady działania zastosowanych metod pomiarowych. Badania [41] wskazują, że uzyskane wartości chropowatości mogą być zależne od metody pomiarowej. Ponadto analiza treści artykułów opisujących ww. badania sugeruje, iż w badaniach brane były pod uwagę także pory powierzchniowe, a w niektórych przypadkach nawet łączenia płyt [37]. W kontekście omawianego zagadnienia, gdzie porowatość powierzchniowa jest rozpatrywana jako osobna cecha, faktura powierzchni powinna być oceniana bez uwzględnienia porów powierzchniowych. Przedstawione wyniki pokazują, jak trudno jest jednoznacznie zdefiniować beton gładki za pomocą parametrów amplitudowych, co może uzasadniać konsekwentne

stosowanie terminu faktura w normach i wytycznych dotyczących betonu architektonicznego [2, 3, 4, 25, 42].

W kontekście niniejszej pracy, na szczególną uwagę zasługuje określenie *powierzchnia gładka*. W języku potocznym gładkość (*smoothnes*) może być łączona z brakiem wyczuwalnych nierówności i być przeciwstawnym pojęciem do szorstkości (*coarseness*) [35]. Nie ma natomiast spójnej definicji gładkości w literaturze naukowej dotyczącej betonu. W związku z tym oraz odnosząc się do wyników omówionych wyżej badań, w niniejszej pracy terminy jak gładkość, chropowatość czy faktura nie będą określane za pomocą parametrów amplitudowych tylko poprzez analizę porównawczą.

Płaskość

Definicja płaskości, rozumianej jako odchylenie powierzchni od płaszczyzny [43], choć często przytaczana w literaturze, nie jest precyzyjna w kontekście betonu architektonicznego. Analiza wytycznych i norm dotyczących tego zagadnienia pozwala jednak na wyodrębnienie istotnych aspektów płaskości i jej wpływu na estetykę powierzchni betonowych. Kluczowym elementem określającym płaskość jest skala, w jakiej analizowana jest powierzchnia. W raporcie technicznym *CEN/TR 15739:2008* [27], rozróżniono dwa rodzaje płaskości:

- **ogólną płaskość**, mierzoną przy użyciu łąty o długości 2 m, która oddaje odchylenia od płaszczyzny w większej skali,
- **płaskość lokalną**, określaną za pomocą linijki o długości 20 cm, która uwzględnia mniejsze nierówności i odchylenia.

Tab. 2.5. Kryteria płaskości powierzchni według raportu technicznego *CEN/TR 15739:2008* (opracowano na podstawie [27])

Płaskość	Typ wykończenia	Ogólna płaskość (łata 2 m)	Płaskość lokalna (linijka 20 cm)
P(0)	kryterium nie brane pod uwagę		
P(1)	zgrubny	$\leq 15 \text{ mm}$	$\leq 6 \text{ mm}$
P(2)	standardowy	$\leq 8 \text{ mm}$	$\leq 3 \text{ mm}$
P(3)	dokładny	$\leq 5 \text{ mm}$	$\leq 2 \text{ mm}$
P(4)	do ustalenia w dokumentach kontraktowych		

Kolorystyka

Kolorystyka jest jedną z kluczowych cech wpływających na estetykę betonu architektonicznego. W przeciwieństwie np. do powłok malarskich, beton charakteryzuje się niejednorodnością koloru powierzchni, wynikającą zarówno z czynników materiałowych (np. rodzaj i barwa cementu, kruszywa), jak i technologicznych warunków podczas wykonywania (np. temperatura, wilgotność podczas wiązania i pielęgnacji) [4].

W kontekście oceny kolorystyki powierzchni betonu architektonicznego można wyróżnić dwa kluczowe aspekty:

- **dominujący kolor powierzchni:** określa dominującą barwę betonu, będącą wynikiem interakcji między kolorem cementu, kruszywa oraz ewentualnych pigmentów. Pomiar koloru może być wykorzystany do weryfikacji zgodności z wymaganiami projektowymi oraz do kontroli powtarzalności koloru między różnymi partiami betonu,
- **jednorodność kolorystyczna:** właściwość ta określa, w jakim stopniu kolor powierzchni jest jednolity, czyli pozbawiony widocznych przebarwień, plam lub innych niejednorodności. Osiągnięcie wysokiego stopnia jednorodności kolorystycznej w przypadku betonu jest wyzwaniem technologicznym, wymagającym starannej kontroli wszystkich etapów produkcji i wbudowania.

2.3. Rodzaje betonu architektonicznego

Beton architektoniczny można podzielić ze względu na różne sposoby kształtowania wyglądu powierzchni, w tym:

- rodzaj końcowej obróbki powierzchni,
- rodzaj i kształt użytego deskowania,
- zastosowane składniki mieszanki betonowej.

2.3.1. Rodzaj końcowej obróbki powierzchni

Źródłem wyczerpującej listy sposobów obróbki powierzchni jest raport techniczny Europejskiego Komitetu Normalizacyjnego (CEN) o oznaczeniu *CEN/TR 15739:2008* [27]. Dzieli on dodatkowo metody obróbki powierzchni na te dokonywane w stanie utwardzonym, plastycznym i na ogólne (*general*), które można zinterpretować jako metody obróbki powierzchni podczas wbudowania. Głównym kryterium podziału jest tu technika obróbki, która bezpośrednio wpływa na końcową charakterystykę powierzchni. Wymienione w raporcie rodzaje powierzchni przedstawione zostały w Tab. 2.6. Warto zwrócić uwagę na fakt, że metoda kształtowania faktury betonu za pomocą opóźniacza wiązania może być stosowana do

odwzorowywania zdjęć i obrazów na powierzchni betonu. Nosi ona nazwę „Serilith-Gravur” lub „Fotolith” [44].

Tab. 2.6. Rodzaje powierzchni betonu według CEN/TR 15739:2008 (opracowano na podstawie [27], tłumaczenie według najlepszej wiedzy autora)

Nazwa według CEN/TR 15739:2008	Opis
powierzchnie uzyskane podczas wbudowania	
nieformowana (<i>unformed surface</i>)	powierzchnia bez obróbki
przeciagnięta łatą (<i>screeded</i>)	wykończenie uzyskane poprzez przeciągnięcie łaty murarskiej po powierzchni betonu
gumowana (<i>rubbed-off</i>)	powierzchnia uzyskana poprzez użycie pacy z gumą lub podobnego narzędzia
kielniowana (<i>trowelled</i>)	powierzchnia uzyskana za pomocą kielni
półpolerowana (<i>semi-polished</i>)	powierzchnia uzyskiwana poprzez półpolerowanie powierzchni betonu szmatką lub styropianem lub szczotkowane
odciśnięta (<i>imprinted</i>)	powierzchnia uzyskana za pomocą wałka dociskowego lub podobnego narzędzia
powierzchnie obrobione w stanie plastycznym	
szczotkowana (<i>brushed</i>)	chropowatość powstała w wyniku szczotkowania świeżej powierzchni sztywnym pędzlem
zmywana wodą (<i>water-washed</i>)	powierzchnia, z której pierwsze 2 mm lub więcej drobnej zaprawy zostały usuwane poprzez zmywanie
drobno zmywana (<i>fine washed</i>)	powierzchnia, z której podczas zmywania usuwa się nie więcej niż 2 mm drobnej zaprawy
powierzchnie obrobione w stanie utwardzonym	
groszkowana (<i>bush hammered</i>)	powierzchnia uzyskana w wyniku złuszczenia powierzchni stwardniałego betonu przez groszkowanie
wytrawiona kwasem (<i>acid-etched</i>)	powierzchnia z odsłoniętym kruszywem, w którym kruszywo zostało odsłonięte przez nałożenie roztworu kwasu na powierzchnię przez jakiś czas i zmyte wodą

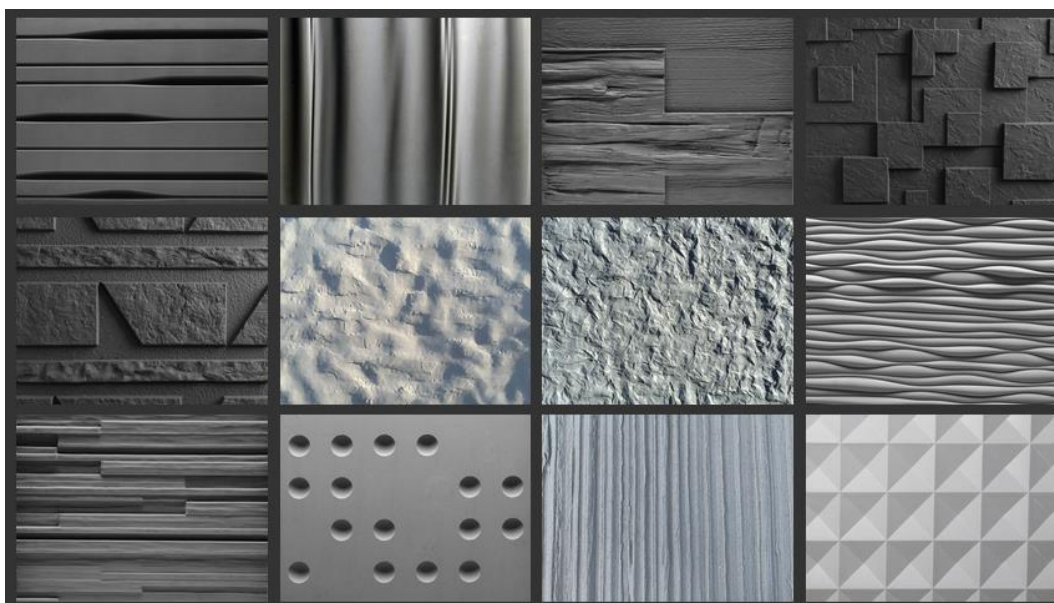
z odsłoniętym kruszywem (<i>chemically retarded</i>)	powierzchnia z odsłoniętym kruszywem, w którym na powierzchnię betonu został nałożony opóźniacz a następnie niezwiązany zaczyn jest splukiwany wodą i/lub wyszczotkowany
łupana/młotkowana (<i>splitted</i>)	powierzchnia nieregularnie wyszczerbiona lub młotkowana, odsłaniająca wszystkie składniki betonu, w tym łamane grube kruszywo
płomieniowana (<i>flamed</i>)	powierzchnia z odsłoniętym kruszywem, w którym górne kilka milimetrów powierzchni zostało złuszczone w wyniku działania płomienia
drobno szlifowana (<i>finely ground</i>)	powierzchnia przeszlifowana na mokro lub na sucho szlifierką mechaniczną w celu częściowego odsłonięcia drobnego kruszywa
szlifowana (<i>grinded</i>)	powierzchnia, która jest jednokrotnie szlifowana bez ścierania. Ślady szlifierki i pory mogą być widoczne
grubo szlifowana (<i>coarsely ground</i>)	powierzchnie zeszlifowane do pewnej głębokości za pomocą mechanicznej szlifierki, używanej na mokro lub na sucho, aby odsłonić głęboką fakturę betonu z pozostawionymi śladami szlifowania dającymi chropowatą powierzchnię
polerowana (<i>polished</i>)	powierzchnia oszlifowana kilka razy coraz drobniejszymi głowicami, aby uzyskać jednolite wykończenie bez widocznych śladów. W zależności od rodzaju kruszywa i końcowej obróbki wykończenie może być błyszczące, z widocznymi porami lub bez
piłowana (<i>sawed</i>)	szorstka powierzchnia bez dodatkowego przygotowania
piaskowana (<i>abrasive blasted</i>)	powierzchnia betonowa piaskowana
erodowana wodą pod ciśnieniem (<i>pressure jetted</i>)	stwardniała powierzchnia betonowa powstała pod działaniem strumienia wody pod wysokim ciśnieniem
śrutowana (<i>shot blasting</i>)	erozja powierzchni przez rzut śrutu stalowego np. powierzchnia powstała w efekcie śrutowania
postarzona (<i>aging</i>)	powierzchnia obrobiona za pomocą specjalnych technik młotkowania nadająca rustykalny i postarzany wygląd
wykuwana (<i>bossed</i>)	powierzchnia dająca efekt ciętych kamieni
dłutowana (<i>point tooling</i>)	wynik obróbki powierzchni stwardniałego betonu za pomocą szpicaka

2.3.2. Rodzaj i kształt użytego deskowania

Istotny wpływ na odbiór estetyczny gotowego elementu z betonu architektonicznego może mieć kształt powierzchni deskowania oraz materiał z jakiego zostało ono wykonane.

Popularną formą wykończenia powierzchni jest pozostawienie gładkiej. Wbrew pozorom, otrzymanie jednolitej gładkiej powierzchni betonu architektonicznego nie jest łatwe do uzyskania, zwłaszcza ze względu na trudność uzyskania jednolitego koloru [11]. Dodatkowo, gładkie powierzchnie mają tendencję do nierównomiernego starzenia się.

Jedną z możliwości uzyskania pożądanej faktury powierzchni betonu jest zastosowanie matryc. Może ona mieć różne formy, jak lico kamienia, prążki czy cegły [45]. Materiałami, z których wykonywane są matryce są elastomery lub tworzywa sztuczne. Także tarcica zastosowana jako deskowanie może być traktowana jako matryca (wtedy odwzoruje się na betonie wzór usłojonego drewna). Na Rys. 2.4 przedstawiono wybrane kształty matryc do betonu.



Rys. 2.4 . Przykładowe matryce do betonu, źródło: <https://apformliner.com>

Matryce mogą być również stosowane do odwzorowywania na powierzchni betonu obrazów czy zdjęć w technice fotografowania. Beton taki nazywany jest wówczas fotobetonem [44]. Inną z możliwości kształtowania powierzchni gotowego elementu jest zastosowanie tkanin [46, 47, 48]. Deskowanie wykonane z tkaniny poza elastycznością charakteryzuje się również dużo niższą wagą i mniejszymi gabarytami w porównaniu do deskowań ze sklejką czy stali. Za pomocą tkaniny można uzyskać złożone kształty, takie jak te przedstawione na Rys. 2.5. Do

wad takich deskowań należy zaliczyć możliwość pękania, które może zostać przyspieszone przez wzrost temperatury występujący podczas hydratacji cementu podczas wiązania i twardnienia betonu. Dodatkowo, deskowania takie wrażliwe są na potrząsanie, dopóki beton w deskowaniu jest w stanie plastycznym [47].



Rys. 2.5. Ściana wykonana z zastosowaniem deskowania z tkaniny, źródło: Wilf Meynell/Studio Bark [48]

2.3.3. Zastosowane składniki mieszanki betonowej

Ostatnim omawianym sposobem na kształtowanie powierzchni betonu jest dobór odpowiednich składników mieszanki betonowej. Podczas gdy deskowanie i obróbka powierzchni wpływają głównie na jej kształt geometryczny, to dobór składników betonu, ma przede wszystkim wpływ na kolor powierzchni, istotny z estetycznego punktu widzenia. Składniki mieszanki, które najbardziej wpływają na kolor gotowej powierzchni betonowej to [46]:

- zastosowane pigmenty,
- rodzaj cementu,
- kruszywo,
- inne dodatki, takie jak np. granulowany, mielony żużel wielkopiecowy.

Pigmenty można dodatkowo podzielić na organiczne i nieorganiczne. Pigmenty organiczne są zwykle jaśniejsze i mocniejsze, lecz nieorganiczne są zwykle tańsze i bardziej stabilne chemicznie [46]. Ich ilość oscyluje w okolicach kilku procent masy cementu [49].

Z punktu widzenia estetyki, możemy podzielić cementy używane do produkcji betonu architektonicznego na dwa rodzaje. Pierwszy obejmuje m.in. cement portlandzki (CEM I),

cement portlandzki wieloskładnikowy (CEM II), cement hutniczy (CEM III), cement puculanowy (CEM IV) czy cement wieloskładnikowy (CEM V) [50]. Cementy te charakteryzuje kolor od jasnoszarego do szarego. Specjalnym rodzajem cementu jest cement biały posiadający znacznie mniejszą ilość związków żelaza i metali ciężkich, nadających zwykłemu cementowi kolor szary [51]. Użycie białego cementu może dać lepszą jednolitość koloru, w przypadku powierzchni gładkiej niż w przypadku stosowania cementów szarych powszechnego użytku [11].

Rodzaj, kolor i wielkość kruszywa są szczególnie istotne przy zastosowaniu betonów z kruszywem eksponowanym. Należy przy tym zwrócić uwagę, że kolor drobnego kruszywa również może wpływać na kolor powierzchni betonu [46].

Z innych dodatków można wymienić granulowany mielony żużel wielkopiecowy (GGBFR), który pozwala uzyskać intensywniejszy kolor betonów barwionych pigmentami [52].

Podsumowując, istnieje wiele możliwości kształtowania i w efekcie otrzymywania różnorodnych powierzchni betonu architektonicznego. Przy tak zróżnicowanych powierzchniach mogą być stosowane, a nawet powinny, różne instrumentalne metody oceny jakości powierzchni jak i ustalone kryteria zgodności. Dlatego, w pracy badawczej ograniczono się do powierzchni gładkiego betonu architektonicznego, zgodnie z definicją przyjętą w rozdziale 2.1, która w dalszej części pracy będzie nazywana powierzchnią betonu.

3. Ocena estetyki powierzchni betonu architektonicznego w ujęciu normowym

Potrzeba wyznaczenia kryteriów dotyczących oceny estetyki powierzchni betonu architektonicznego została zauważona przez autorów wielu norm i instrukcji. Z tego powodu, ocena cech powierzchni betonu architektonicznego jest zarówno zagadnieniem naukowym, jak i normowym.

Analiza obowiązujących norm i wytycznych technicznych daje dobry obraz obecnej praktyki budowlanej. Wskazuje również obszary, które dotąd nie zostały opisane we właściwy sposób, co stanowi potencjalne pole do dalszych badań.

Przy definiowaniu kryteriów oceny powierzchni betonowych nieodłączne powinny być sposoby oceny elementów konstrukcji wykonanych z betonu architektonicznego. W takim przypadku, przy ocenie powierzchni zwraca się także uwagę na takie cechy jak zgodność użytych materiałów, rozmieszczenie łączników, układ i wymiary paneli deskowania [2]. Ze względu na zakres i cele niniejszej pracy ograniczono się jedynie do omówienia cech jakości powierzchni betonu architektonicznego. Wymagania dotyczące innych właściwości gotowych elementów nie będą omawiane.

Dodatkowo, nie we wszystkich normach branych pod uwagę opisano ocenianą powierzchnię jako beton architektoniczny. Jednak, biorąc pod uwagę przyjętą definicję betonu architektonicznego można uznać za beton architektoniczny każdy beton, który nie ulega zakryciu i któremu są stawiane wymagania co do powierzchni. Dlatego zdecydowano się na przeanalizowanie norm i instrukcji, w których można znaleźć wymagania estetyczne stawiane powierzchniom betonowym.

Normy, wytyczne i instrukcje, które w całości lub fragmentach zostały wzięte pod uwagę:

- norma francuska *AFNOR, Normes P18-503 Surfaces et parements de béton - Eléments d'identifications* [53],
- norma brytyjska *BS EN 13670: 2009 Execution of concrete structures* [54],
- norma ukraińska *DSTU B V.2.6-2:2009 Vyroby betonni i żalізobetonni Zagalni technichni umovy* [55],
- norma GOST *13015-2012 Izdelija betonnye i żelezobetonnye dlja stroitel'stwa* [24],
- norma litewska *LST 2015:2020, Surenkamieji betoniniai gaminiai. Paviršiaus išvaizdos charakteristikos ir jų tikrinimo metodai* [42],
- norma austriacka *ÖNORM B 2211, Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonarbeiten* [25],

- norma belgijska *PTV 21-601 Elements Architectoniques et Industriels Prefabriques en Beton Decoratif (2001)* [12],
- amerykańskie wytyczne *ACI 117-10 Specification for Tolerances for Concrete Construction and Materials* [43],
- amerykańskie wytyczne *ACI 303R-12 Guide to Cast-in-Place Architectural Concrete Practice* [8],
- amerykańskie wytyczne *ACI 309.2R-15 Guide to Identification and Control of Visible Surface Effects of Consolidation on Formed Concrete Surfaces* [1],
- amerykańskie wytyczne *ACI 347.3R-13 Guide to Formed Concrete Surfaces* [2],
- niemieckie wytyczne *DBV-Merkblatt Sichtbeton (Fassung August 2004 (2. korrigierter Nachdruck))* [3],
- brytyjskie wydanie raportu technicznego *CEN/TR 15739:2008 Precast concrete products — Concrete finishes — Identification* [27],
- instrukcja *CIB Report No. 24* [56].

Ponadto, na rynku polskim dostępna jest publikacja autorstwa K. Kuniczuka *Beton architektoniczny - wytyczne techniczne* [4], która jest szeroko używana w przemyśle betonowym jako wyznacznik kryteriów oceny w materiałach kontraktowych.

Kryteria oceny można rozróżnić się ze względu na ich charakter ilościowy lub jakościowy. Jako kryteria ilościowe można rozumieć kryteria, które wykluczają subiektywną ocenę danego zjawiska, a więc są niezależne od badacza. Z kolei jako kryteria jakościowe rozumiemy kryteria, w których ocena w dużej mierze zależy od oceniającego, może być subiektywna, a skala oceny jest podana najczęściej w formie opisowej.

Analizując wymienione wcześniej normy i wytyczne oraz biorąc pod uwagę wcześniej zdefiniowane cechy powierzchni betonu architektonicznego, można wymienić następujące aspekty powierzchni betonu architektonicznego, które najczęściej poddawane są ocenie ilościowej lub jakościowej:

- liczba oraz wielkość porów powierzchniowych,
- faktura powierzchni,
- płaskość powierzchni,
- długość i szerokość rys,
- różnice w kolorystyce między powierzchniami, przebarwienia,
- inne wady powierzchni,
- ogólne wrażenie dotyczące powierzchni.

3.1. Powierzchnie odniesienia

W normach i instrukcjach [82, 8] zalecany jest element referencyjny (*mockup*) jako wyznacznik docelowej jakości powierzchni betonu, do którego można odnieść wygląd pozostałych powierzchni. W instrukcji ACI 347.3R-13 [2] mockup jest zdefiniowany jako *próbka elementu budynku określona w dokumentach, która jest wykorzystywana do ustalenia oczekiwanego wykończenia powierzchni*.

Z kolei w ACI 303R-12 [8] zdefiniowano mockup następująco: *pełnowymiarowa próbka betonu architektonicznego wykonana na miejscu przez wykonawcę z zastosowaniem proponowanego sprzętu, materiałów i procedur budowlanych. Całkowita wysokość i szerokość pełnowymiarowego modelu powinny umożliwić demonstrację konstrukcji podłóg, kolumn i ścian* [8]. Tak zdefiniowany element referencyjny jest wykonywany najczęściej jako wolnostojący element niepowiązany z docelową konstrukcją, choć może być częścią realizowanego obiektu. Dodatkowe funkcje elementu referencyjnego to zatwierdzenie środków i metod użytych do osiągnięcia pożądanego wyglądu powierzchni, a także możliwość użycia do zatwierdzenia metod ewentualnych napraw [8]. Przykładowy element referencyjny przedstawiony został na Rys. 3.1.



Rys. 3.1. Przykład elementu referencyjnego według wytycznych ACI 303R-12 [8]

Podobne zadanie do elementu referencyjnego jako powierzchni odniesienia pełni powierzchnia referencyjna, definiowana jako *duży obszar ukończonej betonowej powierzchni służący jako baza porównawcza dla akceptacji powierzchni w określonej lokalizacji projektu* [2]. Kolejnym rodzajem powierzchni porównawczych są *panele referencyjne*. Podczas, gdy elementy referencyjne są wykonywane z myślą o konkretnej budowli, panele referencyjne to obiekty

mające stanowić uniwersalny wzorzec, z którym można porównać powierzchnie otrzymane w trakcie budowy. Przykładem takich konstrukcji są panele referencyjne wzniesione przez grupę CONSTRUCT na terenie kilku lokalizacji w Wielkiej Brytanii [57].



Rys. 3.2. Przykładowy panel referencyjny, źródło: cbdg.org.uk

Innym przykładem powierzchni odniesienia wymienianych w analizowanej literaturze są próbki referencyjne (*finish samples, design reference samples*) [8, 10]. W dokumencie ACI 303R-12 [8] określono ich minimalny wymiar na 18x8 cali (ok. 46x46 cm).

Innymi obiektami zawierającymi powierzchnię odniesienia, które nie są opisane w omawianych instrukcjach, a które posiadają analogiczne cechy są **uniwersalna próbka referencyjna** oraz **powierzchnia referencyjna w istniejącej konstrukcji**.

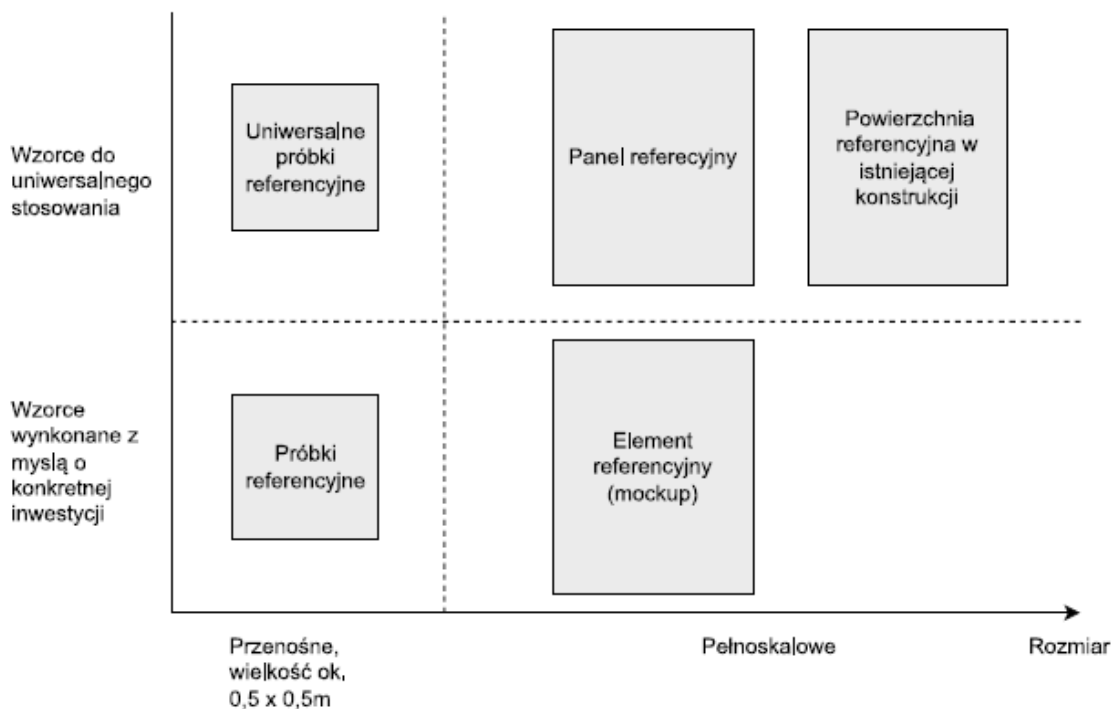
Uniwersalna próbka referencyjna, podobnie jak standardowa próbka referencyjna, służy jako wzorzec wizualny dla porównania z powierzchnią betonu architektonicznego na placu budowy. Kluczowa różnica polega na tym, że o ile tradycyjna próbka referencyjna jest tworzona na potrzeby konkretnej inwestycji i odzwierciedla unikalne wymagania estetyczne, o tyle uniwersalna próbka ma charakter bardziej uniwersalny. Dzięki temu może być ona wykorzystywana jako punkt odniesienia dla wielu różnych projektów, szczególnie tych, w których specyfikacja betonu architektonicznego i oczekiwania co do wykończenia powierzchni są zbliżone. Umożliwia to oszczędność czasu i zasobów, eliminując konieczność wykonywania

odrębnych próbek dla każdego projektu. Wzorniki takie, choć w mniejszej skali są dostępne w przypadku paneli okładzinowych z betonu architektonicznego [58].

Powierzchnia referencyjna w istniejącej konstrukcji pełni funkcję analogiczną do panelu referencyjnego, służąc jako wzorzec wizualny dla oceny estetyki betonu architektonicznego. Zasadnicza różnica polega jednak na tym, że powierzchnia referencyjna nie jest osobną konstrukcją stworzoną wyłącznie w celach porównawczych, lecz integralną częścią już istniejącego obiektu. Odwołanie się do rzeczywistego elementu konstrukcyjnego jako wzorca, zamiast do osobno wykonanego panelu, daje pewność, że porównanie uwzględni wszystkie zmienne związane z procesem starzenia się betonu, wpływem warunków atmosferycznych czy specyfiką danej lokalizacji. Ponadto pozwala to na ocenę wyglądu powierzchni betonowej w kontekście jej rzeczywistego użytkowania, uwzględniając grę światła, wpływ otoczenia czy sposób wkomponowania w bryłę budynku oraz pozwoli na odtworzenie efektów estetycznych uzyskanych w istniejących konstrukcjach, jak na przykład kościoła Le Corbusiera w Firminy [59].

Przytoczone nazwy są autorskimi propozycjami autora pracy mającymi na celu uzupełnienie katalogu możliwych powierzchni odniesienia.

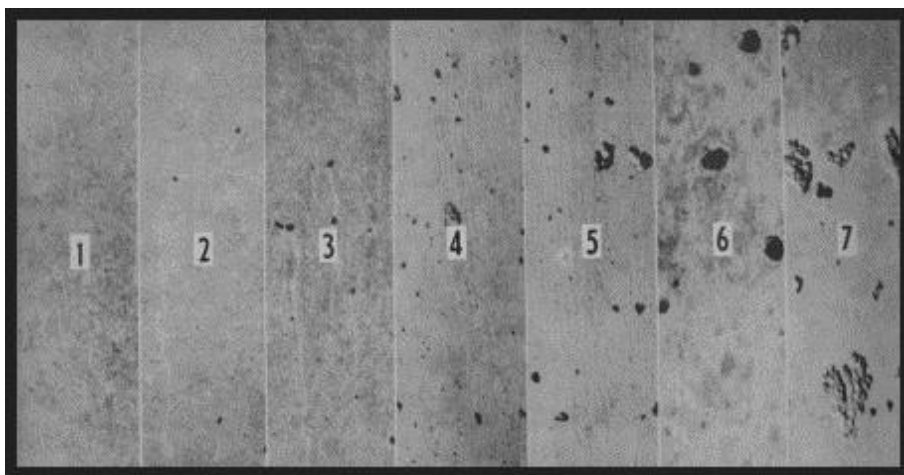
Należy zwrócić uwagę, że najważniejszą funkcją wszystkich wymienionych powierzchni odniesienia jest demonstracja spodziewanych efektów estetycznych wyspecyfikowanych w projekcie elementu z betonu architektonicznego. W zależności od potrzeb mogą być one różnej wielkości, mogą być wykonane z myślą o konkretnej inwestycji lub stanowić uniwersalny wzorzec efektu końcowego.



Rys. 3.3. Podział powierzchni odniesienia ze względu na wielkość i umiejscowienie (opracowanie własne)

3.2. Kryteria oceny porowatości powierzchniowej

Wśród kryteriów oceny pustek powierzchniowych można wyróżnić kilka różnych podejść znajdujących się w analizowanych normach i wytycznych. Pierwsze, znajdujące się w najstarszej omawianej publikacji, które może być nazwane podejściem jakościowym zostało zawarte w instrukcji *CIB Report No. 24* [56]. Ocena porowatości polega w tym wypadku na porównaniu badanych powierzchni do wzornika, a następnie obliczeniu różnicy między numerami wzorników dopasowanych do danej powierzchni. W instrukcji przyjęto różne wymagania dla różnych klas powierzchni oraz rozróżniono powierzchnie bliskie i odległe od siebie (por. Tab. 3.1). Wzornik używany w tej metodzie zaprezentowano na Rys. 3.4. W Tab. 3.1 podano kryteria oceny pustek powietrznych w odniesieniu do podanego wzornika.



Rys. 3.4. Wzornik porowatości z CIB Report No. 24 [56]

Tab. 3.1. Kryteria oceny rozproszonych pustek powietrznych zaproponowane w raporcie CIB No.24 (opracowano na podstawie [56])

Rozważane wady	Klasa powierzchni						
Pustki powietrzne	Specjalna		Podwyższona		Zwykła		Surowa
	Bliskie	Odległe	Bliskie	Odległe	Bliskie	Odległe	
maksymalna dopuszczalna różnica pomiędzy różnymi strefami na skali wskazanej przez załączone fotografie	2	4	4	6	6	-	bez wymogów

Do wzornika CIB można znaleźć odwołanie również w normie *PTV 21-601 (2001)* [12]. W odróżnieniu od *Raportu CIB No.24* [56], w normie *PTV* [12] bezpośrednio wskazano, który numer wzornika odpowiada jakiej klasie powierzchni. Kryteria oceny zawarte w normie *PTV 21-601 (2001)* [12] zostały pokazane w Tab. 3.2.

Tab. 3.2. Kryteria oceny pustek powietrznych zawarte w *PTV-601 (2001)*, (opracowano na podstawie [12])

Rodzaj elementu betonowego	Powierzchnia	Numer wzornika
architektoniczny	gładka	1
	niegładka	2
przemysłowy	gładka	2
	niegładka	3

Bardziej obiektywnym sposobem oceny porowatości powierzchni jest podejście ilościowe. Polega ono na ustaleniu maksymalnego dopuszczalnego udziału powierzchni zajmowanej przez pory w procentach powierzchni. Taki sposób oceny można znaleźć w: *DBV - Merkblatt Sichtbeton* (08/2004) [3], *AFNOR Normes P18-503* [53], *ACI 347.3R-13* [2], *ÖNORM B 2211* [25] czy w publikacji *Beton architektoniczny wytyczne techniczne* [4]. Zestawienie wartości granicznych zajmowanej powierzchni porów, zaczerpniętych z ww. dokumentów, przedstawiono w Tab. 3.3.

Tab. 3.3. Zestawienie kryteriów określających dopuszczalny udział zajmowanej powierzchni przez pory powierzchniowe (opracowano na podstawie [2, 3, 4, 25, 53])

Normy/ wytyczne	Zakres wielkości zliczanych porów	Wielkość badanej powierzchni	Maksymalny udział powierzchni zajmowanej przez pory w zależności od klasy powierzchni	
DBV - Merkblatt Sichtbeton (08/2004)	2 - 15 mm	500x500 mm	P1 - 1,2%	
			P2 - 0,9%	
			P3 - 0,6%	
			P4 - 0,3%	
AFNOR, Normes P18-503	-	500x500 mm	E1 - 10%	
			E2 - 3%	
			E3 - 2%	
ACI 347.3R-13	SVR1 - 2,4 - 19 mm	610x610 mm	SVR1 - 1,2%	
	SVR2 - 2,4 - 16 mm		SVR2 - 1,0%	
	SVR3 - 2,4 - 9,5 mm		SVR3 - 0,6%	
	SVR4 - 2,4 - 6 mm		SVR4 - 0,3%	
ÖNORM B 2211	1 - 15 mm	500x500 mm	3P - 0,9%	
			2P - 0,6%	
			P - 0,3%	
K. Kuniczuk, Beton architektoniczny - wytyczne techniczne	2 - 15 mm	500x500 mm	deskowanie niechłonne:	deskowanie chłonne:
			P1 - 1,2%	P1 - 1,2%
			P2 - 0,94%	P2 - 0,8%
			P3 - 0,64%	P3 - 0,4%

W innym wariantcie oceny porowatości powierzchni, zamiast ogólnego udziału procentowego porów, kryterium oceny może stanowić rozkład wielkości porów, z ograniczeniem liczby defektów o określonych wymiarach. Ponadto, ograniczenia mogą dotyczyć również maksymalnej średnicy oraz głębokości pojedynczych porów. Przykładami norm, które zawierają tak zdefiniowane kryteria oceny są litewska norma *LST 2015:2020* [42] oraz ukraińska norma *DSTU B V.2.6-2:2009* [55]. Szczegółowe zestawienie kryteriów zawartych w ww. normach przedstawiono w Tab. 3.4.

Tab. 3.4. Zestawienie kryteriów określających dopuszczalną liczbę pustek powietrznych o danym rozmiarze (opracowano na podstawie [42, 55])

Nazwa publikacji	Rozmiar pustek powietrznych	Dopuszczalna liczba dla danej klasy powierzchni
LST 2015:2020	5-10 mm	A: 10 B: 20 C: 50
DSTU B V.2.6-2:2009	KP1: do 1 mm KP2: do 10 mm	KP1: 3 na m ² KP2: 5 na m ²

W wielu wytycznych, takich jak np. *ACI 347.3R-13* [2], maksymalne wymiary pustek powietrznych, które są brane pod uwagę przy obliczaniu udziału procentowego powierzchni zajmowanej przez pory, stanowią jednocześnie największe wymiary dopuszczalnych porów w danej klasie powierzchni. Specyficzną regulacją jest norma rosyjska *GOST 13015-2012* [24], w której określono jedynie maksymalny dopuszczalny wymiar pustek powietrznych, nie definiując ich dopuszczalnej liczby, z ograniczeniem wielkości od 1 do nawet 20 mm w zależności od klasy powierzchni.

W szeregu norm [27, 42, 53, 55] określono również maksymalne głębokości dopuszczalnych pustek powietrznych. Ich zestawienie przedstawiono w Tab. 3.5.

Tab. 3.5 . Maksymalne dopuszczalne głębokości pustek powietrznych (opracowano na podstawie [27, 42, 53, 55])

Nazwa dokumentu	Dopuszczalna głębokość porów
DSTU B V.2.6-2:2009	1 mm
LST 2015:2020	5 mm
AFNOR, Normes P18-503	5/3/2 mm
CEN/TR 15739:2008	3/2 mm

Ocena porowatości powierzchniowej stanowi powszechnie akceptowane podejście do oceny jakości betonu architektonicznego, co znajduje odzwierciedlenie w licznych normach i wytycznych branżowych. Zaobserwować można kilka podstawowych schematów oceny, które pomimo pewnych różnic występują w zbliżonej formie w różnych publikacjach. Istotnym ułatwieniem w formułowaniu kryteriów ilościowej oceny porów powierzchniowych jest łatwość w ich definiowaniu za pomocą określenia dopuszczalnego rozmiaru, głębokości czy liczby pustek powierzchniowych (zarówno globalnie, jak i w obrębie wyznaczonego obszaru). Taki sposób formułowania kryteriów oceny umożliwia jej obiektywizację i ułatwia porównywanie wyników badań.

3.3. Kryteria oceny płaskości powierzchni

Kolejnym, dobrze opisanym w przeanalizowanych wytycznych, kryterium oceny powierzchni jest jej płaskość. Jako że cecha ta odpowiada za odchylenia od płaszczyzny, mogą one być mierzone za pomocą łatwo dostępnych narzędzi jak łaty, miarki czy szczelinomierze. Normy i instrukcje wyróżniają kilka rodzajów kryteriów oceny. Pierwszym z nich jest uregulowanie maksymalnych odchyleń od płaszczyzny na zadanej długości. W Tab. 3.6 pokazano kryteria oceny płaskości poprzez zdefiniowanie maksymalnych odchyleń.

Tab. 3.6. Zestawienie kryteriów dotyczących płaskości elementu jako dopuszczalnego odchylenia od płaszczyzny (opracowano na podstawie [3, 12, 27, 24, 43, 53, 54, 56])

Nazwa dokumentu	Długość odcinka pomiarowego	Dopuszczalne odchylenie
ACI 117-10	152,4 cm (5 ft)	Klasa A +1/8 in. (ok. 3 mm) Klasa B +1/4 in. (ok. 6 mm) Klasa C +1/2 in. (ok. 13 mm) Klasa D +1 in. (ok. 25 mm)
DBV - Merkblatt Sichtbeton (08/2004)	różne długości odcinków pomiarowych 0,1/1/4/10/15 m	w zależności od długości odcinka pomiarowego E1: 5/10/15/25/30 mm E2: 3/5/10/20/25 mm E3: 3/5/10/20/25 mm
BS EN 13670: 2009	-	Klasa zwykła: 5 mm Klasa podwyższona: 3 mm
AFNOR, Normes P18-503, Surfaces et parements de béton - Eléments d'identifications, 1989	różne długości odcinków pomiarowych 200/20 cm	w zależności od długości odcinka pomiarowego P(1): 15/6 mm P(2): 8/3 mm P(3): 5/2 mm
PTV 21-601 (2001)	100 cm	powierzchnia w szalunkach: 2 mm
CEN/TR 15739:2008	różne długości odcinków pomiarowych 200/20cm	w zależności od długości odcinka pomiarowego P(1): 15/6 mm P(2): 8/3 mm P(3): 5/2 mm
CIB Report No. 24	20 cm	różnica między najwyższym i najniższym punktem Klasa specjalna: 3 mm Klasa podwyższona: 6 mm Klasa zwykła: 10 mm
GOST 13015-2012	-	wysokość lokalnych przewyższeń lub obniżień: A2: 1 mm A3: 2 mm A4: 1 mm A5: 3 mm A6: 5 mm

Drugim rodzajem kryteriów oceny płaskości jest określenie maksymalnego możliwego przesunięcia płaszczyzn względem siebie, tak zwanego stopnia, występującego przykładowo na łączeniach płyt szalunkowych. W Tab. 3.7 pokazano przykłady wymogów dotyczących maksymalnych wysokości przesunięcia.

Tab. 3.7. Zestawienie kryteriów oceny płaskości jako dopuszczalnego przesunięcia płaszczyzn względem siebie (opracowano na podstawie [3, 54, 56])

Nazwa dokumentu	Dopuszczalna wysokość stopnia na załamaniu płaszczyzn
DBV - Merkblatt Sichtbeton (08/2004)	AF1, AF2: 10 mm AF3, AF4: 5 mm
BS EN 13670: 2009	3 mm
CIB Report No. 24	Klasa specjalna: 3 mm Klasa podwyższona: 6 mm Klasa zwykła: 10 mm

3.4. Kryteria oceny zarysowań

W analizowanych normach i wytycznych, w większości dokumentów nie brano w ogóle pod uwagę rys w ocenie powierzchni betonu pod kątem estetycznym. W tych, w których są uwzględnione rysy, podano kryteria dotyczące takich cech zarysowań jak szerokość, głębokość czy dopuszczalna długość.

Przykładowe wymagania dotyczące zarysowań podano w Tab. 3.8. Istotnym spostrzeżeniem jest, że przedstawione kryteria nie uwzględniają liczby rys na metr kwadratowy konstrukcji. Brak kryteriów dotyczących rys w większości przeanalizowanych publikacji, pomimo że ich zliczenie nie byłoby trudniejsze niż zliczenie liczby porów, może sugerować, iż obecność jakichkolwiek zarysowań może być niedopuszczalna. Wszystkie pojawiające się w przeanalizowanych publikacjach kryteria oceny zarysowań są kryteriami ilościowymi. Może to ułatwić jednoznaczną klasyfikację powierzchni, gdy zarysowania są brane pod uwagę.

Tab. 3.8. Zestawienie kryteriów dotyczących oceny zarysowania betonów architektonicznych (opracowano na podstawie [24, 54])

Nazwa dokumentu	Dopuszczalna szerokość rys	Dopuszczalna długość rys	Dopuszczalna głębokość rys
BS EN 13670: 2009	zbrojona konstrukcja nośna - 0,3 mm płyty fundamentowe - 2,0 mm płyty na stalowym deskowaniu traconym - 1,0 mm	-	-
GOST 13015-2012	-	A1: 20 mm A2: 50 mm A3: 50 mm A4: 50 mm A5: 100 mm A6: 100 mm	A1: 2 mm A2: 5 mm A3: 5 mm A4: 5 mm A5: 10 mm A6: 10 mm A7: 20 mm

3.5. Kryteria oceny różnic kolorystycznych

Kryteria dotyczące jednorodności kolorystycznej cieszą się znaczną uwagą w literaturze przedmiotu oraz normach branżowych. Kwestia ta została szeroko omówiona m.in. w następujących publikacjach: *ACI 347.3R-13* [2], *DBV - Merkblatt Sichtbeton (08/2004)* [3], *BS EN 13670: 2009* [54], *AFNOR Normes P18-503* [53], *PTV 21-601 (2001)* [12], *ÖNORM B 2211* [25], *CEN/TR 15739:2008* [27], *Beton architektoniczny - wytyczne techniczne* [4] oraz *CIB Report No. 24* [56].

Powszechne uwzględnianie kryteriów oceny jednorodności kolorystycznej w analizowanych normach i wytycznych sugeruje, że cecha ta odgrywa istotną rolę w kształtowaniu ogólnego odbioru estetycznego powierzchni betonu architektonicznego. Analiza przytoczonych dokumentów pozwala wyróżnić dwa dominujące podejścia do oceny jednorodności kolorystycznej. Pierwsze z nich określić można mianem podejścia jakościowego. Opiera się ono na sformułowaniu wymagań opisowych dotyczących dopuszczalnych odstępstw od założonej jakości powierzchni. W ramach tego podejścia często stosuje się nieprecyzyjne sformułowania odnoszące się do rozmiarów defektów, takie jak: „niewielkie”, „rozległe”, „nieznaczące” czy „umiarkowane”. Ponadto, w ramach wymagań jakościowych wskazuje się nierzadko na dopuszczalność bądź niedopuszczalność wad wynikających z działania

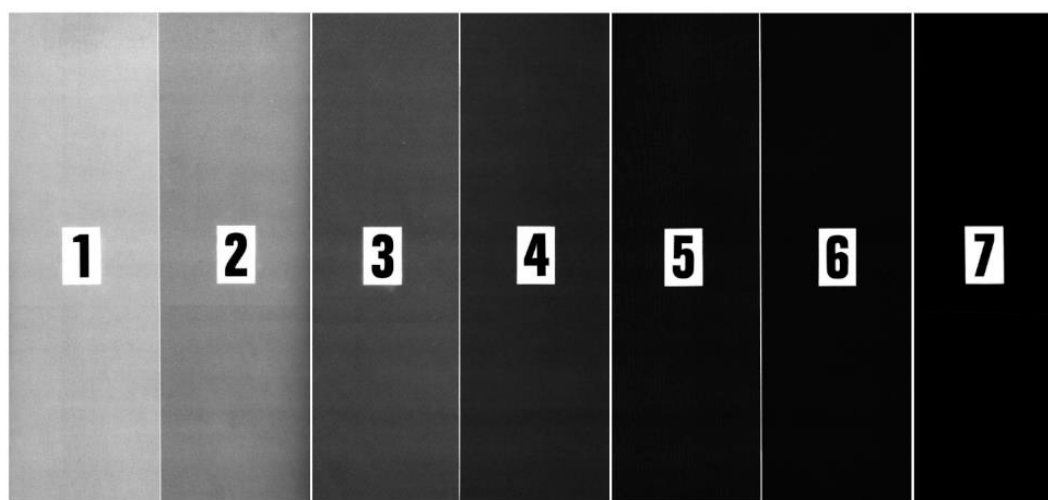
określonych czynników. Wymagania dotyczące kolorystyki powierzchni betonu dla najwyższych klas estetycznych zestawiono w Tab. 3.9.

Tab. 3.9 . Zestawienie wymagań jakościowych dotyczących kolorystyki (opracowano na podstawie [2, 3, 4, 54], tłumaczenie według najlepszej wiedzy autora)

Nazwa dokumentu	Wymagania dotyczące najwyższej klasy powierzchni
ACI 347.3R-13	CU3: przebarwienia spowodowane materiałami składowymi betonu różnego rodzaju i pochodzenia, różne typy zabiegów dokonywane na materiałach wierzchnich lub niespójne wykończenie powierzchni betonu jest niedopuszczalne. Plamy rdzy, zabrudzenia z błota oraz widoczne warstwy betonowania są niedopuszczalne.
DBV - Merkblatt Sichtbeton (08/2004)	FT3: rozległe przebarwienia niedozwolone, dopuszczalne są nieznaczne jasne/ciemne przebarwienia (np. nieznaczne odchylenia kolorów).
BS EN 13670: 2009	Klasa podwyższona: mogą wystąpić tylko bardzo niewielkie, nieodłączne skazy powierzchniowe, bez przebarwień spowodowanych środkiem antyadhezyjnym lub wyciekającą zaprawą. Powierzchnia powinna mieć spójny kolor.
K. Kuniczuk, Beton architektoniczny - wytyczne techniczne	BA3: niedopuszczalna rdza, brudne zacieki, warstwy mieszanek, zmiany zabarwienia, poza niewielkimi.

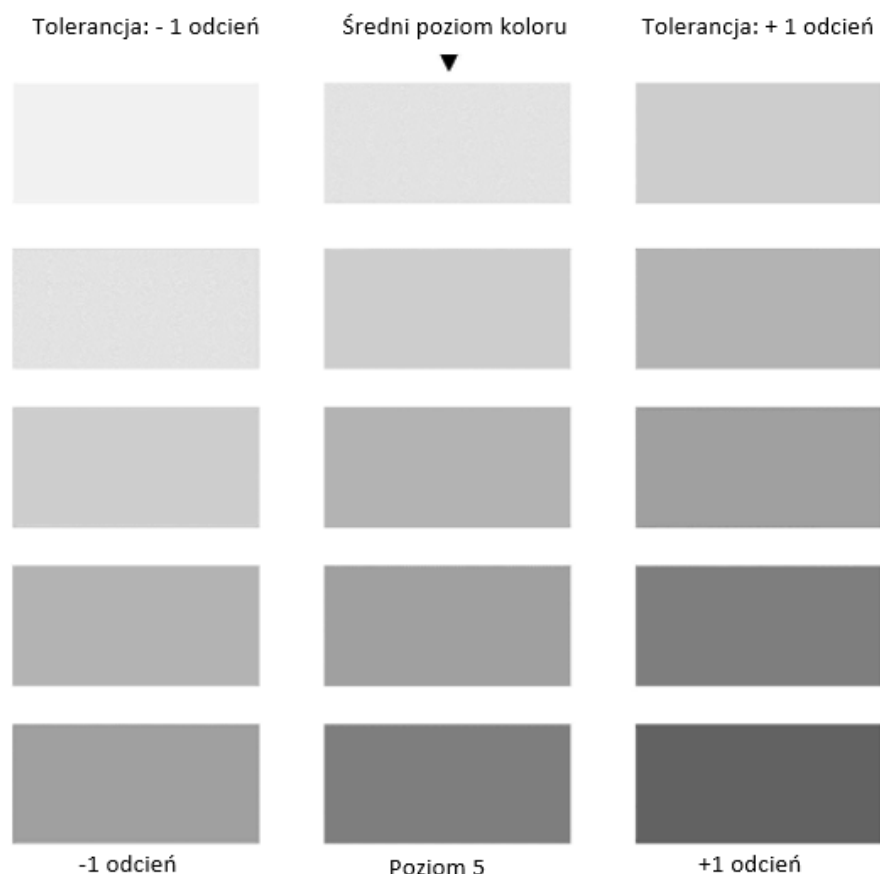
Innym podejściem do oceny jednorodności kolorystyki są metody wykorzystujące wzorniki kolorów. Metody te opierają się w pierwszej kolejności na dopasowaniu najbardziej podobnego koloru ze wzornika kolorów, do średniego koloru każdego analizowanego fragmentu powierzchni. Następnie porównuje się numery dopasowanych kolorów ze wzornika poprzez obliczenie różnicy w numeracji dopasowanych kolorów. Otrzymany wynik porównuje się z kryteriami dla danej klasy powierzchni, biorąc pod uwagę fakt, czy oceniane powierzchnie leżą w swoim sąsiedztwie czy też znajdują się w znacznej odległości od siebie. Przykładem takiego wzornika jest wzornik zawarty w *CIB Report No. 24*. (Rys. 3.5) [56]. Ponadto, brytyjskie wydanie raportu technicznego *CEN/TR 15739:2008* [27] korzysta ze zmodyfikowanego wzornika CIB pokazanego na Rys. 3.6. Interesujący jest fakt, iż wzornik zawarty w *CEN/TR*

15739:2008 [27] składa się z jaśniejszych odcieni szarości w stosunku do oryginalnego wzornika CIB. Cechą wspólną wymienionych wzorników jest to, że obydwa operują na skali odcieni szarości, jako że powierzchnie betonowe najczęściej posiadają taką gamę kolorystyczną. Z tego powodu, metoda ta nie może być stosowana do betonów barwionych. Ponadto należy zauważyć, że czynnikiem, który może wpłynąć na ostateczny wynik oceny, może być jakość wydruku. W raporcie technicznym *CEN/TR 15739:2008* [27] zawarto wymaganie, aby wzornik był wydrukowany na papierze matowym.



Rys. 3.5. Wzornik kolorów według *CIB Report No. 24* (opracowano na podstawie [56])

Wykres kolorów oparty jest na siedmiostopniowej skali szarości CIB (<i>Report No. 24</i>). Pięć poziomów koloru średniego odpowiada odcieniom 2, 3, 4, 5 i 6 skali CIB, a tolerancja wynosi +/- 1 odcień.	Specyfikacja: T4 Średni kolor: 3 Odchylenie: +/- 1			Specyfikacja: T3 Średni kolor: 2 Odchylenie: +/- 2		
		1		-1	1	
		2			2	
	Przykłady	-3	3	+3		+3
		4			4	
		5			5	



Rys. 3.6. Wzornik koloru powierzchni betonu według brytyjskiego wydania raportu technicznego CEN/TR 15739:2008. Kolumna środkowa zawiera odcienie szarości ponumerowane od 1 do 5, kolumna po lewej zawiera w tym samym wierszu kolory o jeden stopień jaśniejsze, z kolei kolumna po prawej kolory o jeden stopień ciemniejsze w stosunku do kolumny środkowej (opracowano na podstawie [27])

Omawiane podejście do oceny kolorystyki może być nazwane podejściem połowicznie ilościowym, gdyż samo przyporządkowanie powierzchni betonu do numeru we wzorniku zależy w całości od subiektywnego wrażenia osoby wykonującej pomiar. Pełne zestawienie przeanalizowanych wytycznych i instrukcji, które do oceny kolorystyki używają wzorników koloru, podane zostało w Tab. 3.10.

Tab. 3.10. Zestawienie kryteriów oceny kolorystyki wykorzystujących wzorniki koloru (opracowano na podstawie [12, 27, 56])

Nazwa dokumentu	Dopuszczalne różnice odcieni według wzornika CIB
metody wykorzystujące wzornik koloru zaproponowany w CIB Report No. 24	
CIB Report No. 24	Maksymalna różnica odcieni wzornika dla przylegających/odległych powierzchni: Klasa specjalna: 2/2 Klasa podwyższona: 2/3 Klasa zwykła: 3/4
PTV 21-601 (2001)	Dopuszczalna różnica odcieni wzornika w skali CIB: beton architektoniczny: 2 beton zwykły: 3
AFNOR, Normes P18-503	Odchylenia dopuszczalne w skali szarości odpowiednio między dwoma sąsiednimi obszarami o różnych odcieniach i między dwoma odległymi obszarami: T(1): 3 i 4 T(3): 1 i 2
metody wykorzystujące wzornik koloru zaproponowany w CEN/TR 15739:2008	
CEN/TR 15739:2008	C(3): Dopuszczalne odchylenie między dwoma sąsiednimi obszarami: 1 odcień od średniego koloru. Dopuszczalne odchylenie między dwoma nieprzylegającymi do siebie obszarami: 2 odcienie od średniego koloru. C(4): Dopuszczalne odchylenie między dwoma sąsiednimi obszarami: 1 odcień od średniego koloru. dopuszczalne odchylenie między dwoma nieprzylegającymi do siebie obszarami: 1 odcień od średniego koloru.

W raporcie technicznym *CEN/TR 15739:2008* [27] opisano dodatkowo sposób rozstrzygania ewentualnych konfliktów w ocenie kolorystyki za pomocą kolorymetru. W przypadku oceny przebarwień w obrębie danego elementu, dokonuje się sześciu pomiarów w obrębie przebarwienia i sześciu pomiarów w obrębie pozostałej części elementu. Z kolei do pomiaru różnic kolorystyki między elementami wykonuje się po sześć pomiarów na każdym ocenianym elemencie. Następnie oblicza się różnice kolorystyczne ΔE jako odległość euklidesową w przestrzeni barw CIELAB. Ostatecznie przelicza się otrzymany wynik na ekwiwalent różnicy między odcieniami szarości, obliczanymi przy użyciu wzornika za pomocą wzoru $\Delta E/5$.

3.6. Kryteria oceny faktury

Kryteria oceny faktury, opisane w analizowanych normach i wytycznych, można zaklasyfikować do kilku kategorii. Pierwsza z nich obejmuje określenie dopuszczalnych wysokości i/lub szerokości napływów na styku płyt szalunkowych. Kolejna kategoria dotyczy określenia gładkości powierzchni betonowej w sposób opisowy, przy użyciu terminów takich jak „gładka”, „jednorodna”, „zamknięta”. Ostatnia kategoria obejmuje określenie dopuszczalności lub niedopuszczalności określonych wad faktury, wynikających z działania konkretnego czynnika. Tak podzielone kryteria dotyczące faktury powierzchni zostały pokazane w Tab. 3.11.

Tab. 3.11. Kryteria oceny wad faktury w ujęciu normowym (opracowano na podstawie [2, 3, 4, 25, 42])

Nazwa dokumentu	Klasa	Wysokość/szerokość lokalnych wad	Kryteria opisowe	Kryteria dotyczące znanych czynników powodujących wady faktury
ACI 347.3R-13	T1	Dopuszczalne szczeliny w sąsiednich elementach szalunku $\leq 3/4$ cala (19 mm) (6,1 godz.). Dopuszczalna głębokość utraty zaprawy $\leq 1/2$ cala (13 mm). Dopuszczalne przesunięcia powierzchni połączeń paneli do 1 cala (25 mm). (ACI 117-10, sekcja 4.8.3, klasa D). Dopuszczalne występy 1 cal (25 mm) od sąsiedniej powierzchni. (ACI 301-10, sekcja 5.3.3.3.a).	-	Dopuszczalne są nadruki ram panelowych modułowych.
	T2	Dopuszczalne szczeliny w sąsiednich elementach szalunku $\leq 1/2$ cala (13 mm) (6,1 j). Dopuszczalna głębokość utraty zaprawy $\leq 3/8$ cala (10 mm). Dopuszczalne występy $1/2$ cala (13 mm) od sąsiedniej powierzchni.	-	Dopuszczalne są nadruki ram panelowych modułowych.

	T3	Dopuszczalne odstępstwa w sąsiednich elementach szalunku $\leq 1/4$ cala (6 mm) (6,1 j). Dopuszczalna głębokość utraty zaprawy $\leq 1/4$ cala (6 mm). Dopuszczalne występy $1/4$ cala (6 mm) od sąsiedniej powierzchni (ACI 301-10, rozdział 5.3.3.3.b).	-	Dopuszczalne są nadruki ram panelowych modułowych.
	T4	-	-	Odciski modułowych ram panelowych są niedopuszczalne, chyba że zostaną wykazane i zatwierdzone na makiecie.
DBV - Merkblatt Sichtbeton (08/2004)	T1	Dopuszczalny wypływ zaczynu w obszarze kontaktu deskowań do około 20 mm szerokości i 10 mm głębokości.	Powierzchnia zamknięta.	Dopuszczalne odbicie ram konstrukcyjnych.
	T2	Dopuszczalny wypływ zaczynu w obszarze kontaktu deskowań do ok. 10 mm szerokości i 5 mm głębokości.	Powierzchnie zamknięte o dużym stopniu jednolitości.	Dopuszczalne odbicie ram konstrukcyjnych.
	T3	Dozwolony wypływ zaczynu do ok. 3 mm szerokości. Dozwolone spoiny technologiczne do około 3 mm szerokości.	Gładkie, zamknięte powierzchnie o wysokim stopniu jednorodności.	-
ÖNORM B 2211	S1	Powierzchnia betonu z powodu wydostawania się zaczynu cementowego i/lub drobnej zaprawy nie przekraczała 1 cm.	Gładkie, zamknięte powierzchnie betonowe Na gładkiej powierzchni mogą pojawić się szerokie pasy.	-
	S2	Jak S1, ale połączenia pomiędzy sąsiednimi elementami szalunku muszą być odpowiednio szczelne, że praktycznie żaden zaczyn cementowy i/lub drobnoziarnista zaprawa nie może się wydostać.	-	-

Beton Architektoniczny Wytyczne techniczne	F1	Zaczyn cementowy/zaprawa występująca na złączach elementów - szerokość do ok. 20 mm i głębokość do ok. 10 mm.	W dużej mierze jednorodna powierzchnia betonowa.	Dozwolony odcisk ramy elementu deskowania.
	F2	Zaczyn cementowy/zaprawa występująca na złączach elementów - szerokość do ok. 10 mm i głębokość do ok. 5 mm.	W dużej mierze jednorodna powierzchnia betonowa.	Dozwolony odcisk ramy elementu deskowania.
	F3	Zaczyn cementowy/zaprawa występująca na złączach elementów - szerokość do ok. 3 mm.	Gładka, zamknięta i jednorodna powierzchnia betonowa.	-
LST 2015:2020	A	Liczba powstałych wybrzuszeń na 1 m ² : wysokość 1 mm: 0 wysokość 2 mm: 0 wysokość 3 mm: 0	-	-
	B	Liczba powstałych wybrzuszeń na 1 m ² : wysokość 1 mm: 10 wysokość 2 mm: 0 wysokość 3 mm: 0	-	-
	C	Liczba powstałych wybrzuszeń na 1 m ² : wysokość 1 mm: 20 wysokość 2 mm: 5 wysokość 3 mm: 3	-	-

3.7. Ogólny wygląd powierzchni

W niektórych wytycznych, takich jak instrukcja *ACI 347.3R-13* [2], sprawdzanie założonych parametrów powierzchni jest wymagane jedynie w przypadku, gdy ogólne wrażenie powierzchni nie jest akceptowalne. Dzięki temu pracochłonna analiza mająca odpowiedzieć na pytanie czy dana powierzchnia spełnia założone wymagania, stosowana jest wyłącznie w przypadku tych powierzchni, które nie przeszły przez pierwszą, przesiewową ocenę wizualną. Dodatkowo, w *ACI 347.3R-13* [2] określono minimalny dystans oceny wizualnej na ok. 6 m (20 stóp), jeśli obserwator stoi prostopadle do powierzchni. Ma to pozwolić na ocenę całej powierzchni betonu. Dodatkowym czynnikiem, na który zwraca się uwagę przy ocenie

wizualnej, są warunki oświetleniowe. W *ACI 347.3R-13* [2] odradza się dokonywanie oceny powierzchni przy świetle padającym pod dużym kątem (por. Rys. 2.1). Kolejnym wymogiem przy prowadzeniu ogólnej oceny, który bywa stawiany w we wspomnianych wytycznych, jest minimalny wiek danego elementu. W *ACI 347.3R-13* [2] określono go na 8 tygodni, po których przebarwienia na powierzchni betonu stają się zwykle widoczne.

Istotnym elementem niezbędnym do prawidłowej oceny powierzchni, rekomendowanym w niektórych wytycznych, jest wykonanie elementów referencyjnych (por. rozdz. 3.1) na placu budowy, w przypadku elementów o wyższych klasach jakości powierzchni [2, 3, 4].

3.8. Podsumowanie kryteriów oceny

Podsumowując, do cech, które zostały w zadowalający sposób opisane w analizowanych normach i wytycznych pod kątem kryteriów ilościowych, można zaliczyć porowatość, płaskość powierzchni oraz rysy.

Opisy znajdujące się w normach dotyczące sposobu oceny zarysowań wydają się wystarczające do przeprowadzenia oceny w sposób obiektywny. Jednakże, brak uwzględnienia tego kryterium w większości publikacji może świadczyć o fakcie, iż nie jest to kryterium często brane pod uwagę lub rysy w żadnym stopniu nie są akceptowalne dla projektantów.

Parametrem, który najczęściej jest brany pod uwagę przy ocenie porowatości powierzchni jest udział procentowy powierzchni porów wyrażany w procentach [2, 3, 4, 25, 53] przy jednoczesnym ograniczeniu dolnej i górnej granicy średnicy zliczanych porów [2, 3, 4, 25].

Z kolei do cech powierzchni, których ocena w publikacjach w dużej mierze opisana jest w sposób mało precyzyjny (jakościowy), można zaliczyć jednorodność kolorystyczną powierzchni oraz fakturę powierzchni.

W przypadku oceny kolorystyki powierzchni, większość wymogów jest stawiana w sposób opisowy, co może prowadzić do nieporozumień i sprzecznych opinii wśród grona oceniającego. Zastosowanie wzorników także nie gwarantuje obiektywności pomiaru. Jedynie badanie kolorymetrem można uznać za pomiar ilościowy, jednak ze względu na niewielkie pole powierzchni analizowane jednorazowo przez kolorymetr, wynik tego badania w dużym stopniu może zależeć od miejsca przyłożenia urządzenia. Ocena kolorystyki w analizowanych dokumentach koncentruje się na ocenie przebarwień na danej powierzchni [2, 3, 4, 12, 27, 53, 54, 56] oraz na różnicach kolorystyki między obszarami odległymi od siebie [27, 53, 56].

W przypadku oceny faktury powierzchni, występują próby jej opisu ilościowego. Dotyczy to głównie wad punktowych lub liniowych takich jak wypływy zaczynu na łączeniach

deskowania. Ponadto, zauważa się, że w kryteriach oceny powierzchni podawanych jako kryteria oceny faktury, poza oceną chropowatości powierzchni, uwzględniane są także wady powierzchni o większych rozmiarach (np. odcisk ramy deskowania, szczeliny, wpływ zaczynu).

Biorąc pod uwagę powyższe wnioski, widoczny staje się problem ilościowego opisu jednorodności kolorystycznej. W kolejnych rozdziałach części teoretycznej pracy zostaną przeanalizowane istniejące metody badawcze dotyczące oceny porowatości oraz kolorystyki powierzchni. Ilościowy pomiar wymienionych cech pozwoli na obiektywną, wieloaspektową ocenę powierzchni betonu architektonicznego.

4. Ilościowe metody oceny porowatości i kolorystyki powierzchni betonu

4.1. Metody oceny porowatości

Porowatość powierzchniowa ma istotny wpływ na estetykę powierzchni betonowych. W literaturze można odnaleźć wiele metod oceny porowatości powierzchni. Metody oceny jakości powierzchni betonu architektonicznego powinny być nieniszczące, a stosowane urządzenia - przenośne. Ponadto, wynik pomiaru powinien być jak najmniej zależny od osoby wykonującej badanie.

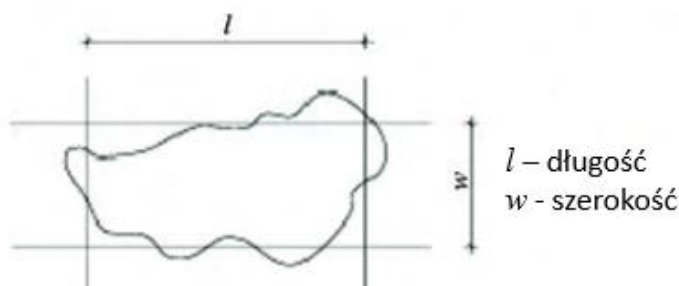
Badania porowatości możemy podzielić na badania porowatości powierzchniowej oraz całkowitej. Istnieje wiele metod badania porowatości całkowitej, takich jak mikrotomografia komputerowa, metody grawimetryczne czy porozymetria rtęciowa. Ich zastosowanie w kontekście oceny estetyki powierzchni jest jednak ograniczone, gdyż nie pozwalają one na wyodrębnienie cech istotnych dla powierzchni takich jak udział procentowy powierzchni porów czy rozkład wielkości porów na powierzchni.

W dalszej części rozdziału szczegółowo omówione zostaną wybrane metody badania porowatości powierzchniowej betonu, ze szczególnym uwzględnieniem ich zalet, ograniczeń oraz przydatności w kontekście oceny estetyki powierzchni betonowych.

4.1.1. Manualna ocena porowatości

Metoda prostokątów

Jedną z metod oceny porowatości powierzchniowej jest tak zwana **metoda prostokątów** (*rectangle method*) opisana w ACI 347.3R-13 [2]. Polega ona na pomiarze długości i szerokości każdego poru w celu obliczenia jego powierzchni. Powierzchnia mierzonej pustki poza obszarem prostokąta, powinna być przy tym możliwie jak najbardziej zbliżona do powierzchni bez pustek wewnątrz prostokąta. Czynność ta jest powtarzana dla wszystkich pustek o ustalonej minimalnej wielkości na wyznaczonym obszarze. Na Rys. 4.1 znajduje się schemat pomiaru pojedynczej pustki.



Rys. 4.1. Schemat pomiaru pojedynczej pustki według metody prostokątów [60]

Metoda zliczania kwadratów

Inną metodą jest wspomniana w pracy *Examination and Evaluation of ACI 347.3R-13 Guide to Formed Concrete Surfaces* [60] **metoda zliczania kwadratów**. Polega ona na odrysowaniu granic pustek powietrznych na papierze milimetrowym, a następnie na zliczeniu liczby zakrytych kwadratów oraz na oszacowaniu pola tylko częściowo zajętego przez kwadraty na papierze milimetrowym.

Metoda zliczania wycinków papieru

Kolejną ręczną metodą jest **metoda zliczania wycinków papieru** [60]. Polega ona na zważeniu płachty papieru, odrysowaniu na niej pustek powietrznych, ich wycięciu, a następnie zważeniu wycinków. Procentowy stosunek wagi wycinków do wagi całej płachty odpowiada procentowej powierzchni porów na powierzchni.

Metoda planimetryczna

Metodą nieco bardziej zautomatyzowaną jest **metoda planimetryczna** [60]. Polega ona na użyciu urządzenia - planimetru - do pomiaru powierzchni każdej pustki powietrznej na zadanym obszarze. Pomiar musi być wykonany osobno dla każdej pustki, co przekłada się na długi czas całkowity pomiaru.

Metoda z zastosowaniem krzywomierza

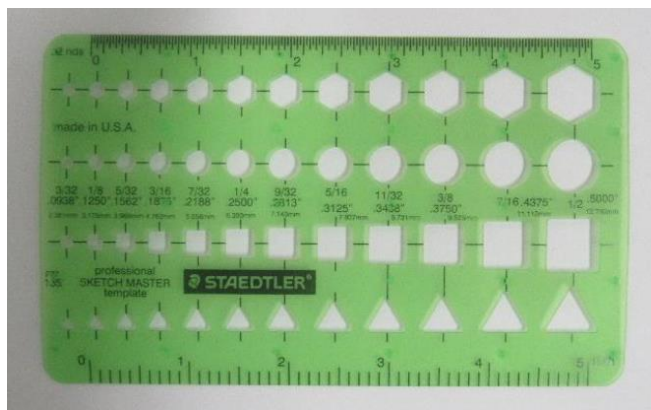
Metodą podobną do metody planimetrycznej jest **metoda z zastosowaniem krzywomierza** [60]. Za jego pomocą obrysowuje się obwód pustek powietrznych, a następnie oblicza się pole okręgu o obwodzie równym obwodowi pustki. Wadą tej metody może być brak możliwości pomiaru bardzo małych porów powierzchniowych oraz duże niedokładności przy pustkach o wydłużonym kształcie.



Rys. 4.2. Przykładowy krzywomierz używany do mierzenia obwodu pustek powietrznych [60]

Metoda z zastosowaniem wzornika wielkości otworów

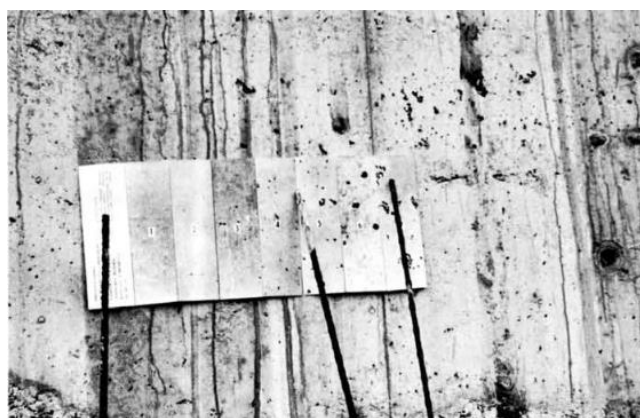
Innym sposobem obliczania powierzchni porów powierzchniowych jest użycie **wzornika wielkości otworów** [60]. Badanie polega na dopasowaniu każdej pustki powietrznej do wzornika i na tej podstawie oszacowaniu jej pola. Pomiar taki należy przeprowadzić dla wszystkich otworów znajdujących się na badanej powierzchni. Na Rys 4.3 przedstawiono przykładowy wygląd wzornika.



Rys. 4.3. Przykładowy wzornik wielkości otworów [60]

Metoda z zastosowaniem wzornika porowatości

Ocena porowatości za pomocą wzornika polega na porównaniu badanej powierzchni do wzornika i nadaniu jej klasy zgodnej z najbardziej pasującym wzorcem. Przykład takiego wzornika zaprezentowano w *CIB Report No. 24* [56]. Metoda ta jest łatwa do zastosowania, jednak wynik może w dużym stopniu zależeć od osoby wykonującej badanie. Rys. 4.4 przedstawia pomiar porowatości powierzchni za pomocą wzornika porowatości CIB.



Rys. 4.4. Określanie porowatości powierzchni z użyciem wzornika CIB. W tym przypadku powierzchnia została sklasyfikowana do kategorii 7. [56]

4.1.2. Zautomatyzowana ocena porowatości

Automatyczne metody oceny porowatości powierzchni opierają się na metodach komputerowej analizy obrazu [18, 19, 20, 61, 62, 63, 64, 65, 66]. Kluczowym wyzwaniem w tym kontekście jest precyzyjne wyodrębnienie obszaru porów od tła. W literaturze przedmiotu spotykane są różnorodne podejścia do rozwiązywania tego problemu.

Jedną z metod jest wstępne przygotowanie próbek poprzez malowanie ich powierzchni, celem zwiększenia kontrastu pomiędzy porami a powierzchnią betonu [18]. Innym sposobem jest wykorzystanie cienia rzucanego przez słońce lub sztuczne źródła oświetlenia [19, 20, 61, 62, 63, 64]. Należy jednak zaznaczyć, że efektywność detekcji porów w tym wypadku jest silnie uzależniona od panujących warunków oświetleniowych. Precyzyjna identyfikacja porów staje się utrudniona w szczególności przy małym kącie padania światła, gdy dno pustki powietrznej jest oświetlone w stopniu zbliżonym do powierzchni betonu (por. Rys. 2.1).

Istotnym elementem wpływającym na dokładność pomiaru jest również zastosowany algorytm segmentacji obrazu, odpowiedzialny za wyodrębnienie porów od tła. W literaturze można znaleźć szereg propozycji w tym zakresie, z których każda opiera się na odmiennych algorytmach binaryzacji obrazu. W Tab. 4.1 zaprezentowano zestawienie wybranych cech metod automatycznego zliczania porów, proponowanych przez różnych autorów. Szczegółowe objaśnienia terminów zawartych w tabeli znajdują się w rozdziałach 5 i 6.

Tab. 4.1. Zestawienie wybranych cech metod automatycznego zliczania porów (b/d - brak informacji na dany temat)

Pozycja w bibliografii	Obróbka wstępna	Sposób wyodrębniania porów od tła	Algorytm binaryzacji	Warunki fotografowania
22	redukcja szumów	malowanie powierzchni	progowanie globalne	b/d
15	redukcja szumów, filtr median	cień przy użyciu źródła światła D65	algorytm Maximum Entropy, otwarcie, filtr Convex	b/d
17	erozja, dylatacja, otwarcie, zamknięcie	cień	algorytm łączący progowanie lokalne i globalne (w tym OTSU 11x11)	Nikon D1X z obiektywem NIKKOR AF-S
20	wzmocnienie kontrastu	cień	OTSU	odległość fotografowania 40 cm

21	filtr gabora	cień	b/d	Canon EOS M10 oraz Nikon D5100
29	b/d	cień w świetle zastanym	b/d	odległość fotografowania 500 mm
31	b/d	cień w świetle zastanym	b/d	aparat iPhone X, powierzchnia obrazu (m2) 0,01
35	filtr wiener, filtrowanie bottom-hat, wzmocnienie kontrastu	cień	b/d	b/d
19	redukcja szumów, filtr median	b/d	Niblack	Canon EOS 60D DSLR, ogniskowa 55 mm

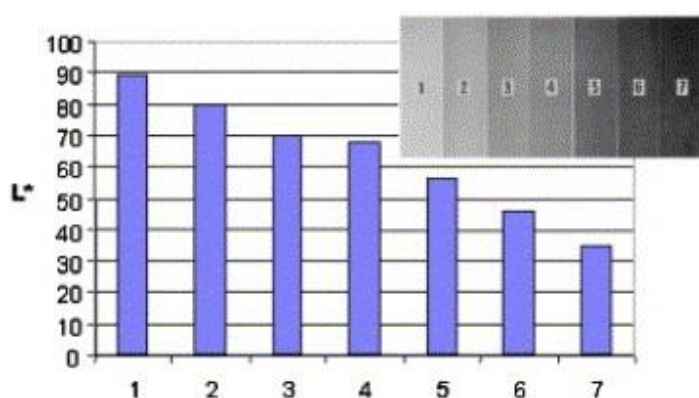
Należy podkreślić, że na ostateczny wynik analizy mogą wpływać również inne czynniki, takie jak kolor czy chropowatość badanej powierzchni. W analizowanych publikacjach nie uwzględniono wpływu tych parametrów na uzyskane rezultaty.

4.2. Metody oceny kolorystyki

Mimo braku kryteriów ilościowych oceny kolorystyki powierzchni betonu w omawianych normach, istnieje obecnie szereg metod pozwalających na jej ocenę. Metody te zasadniczo różnią się tym czy badają bezpośrednio kolor powierzchni czy też skupiają się na względnych różnicach koloru. Istotnym czynnikiem różnicującym te metody jest także rozmiar badanej powierzchni.

Wzorniki kolorów

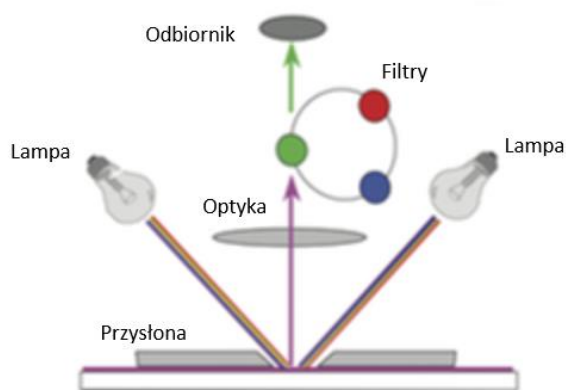
Sposobem na określenie kolorystyki powierzchni wymienionym w normach jest użycie wzorników kolorów. Pomiar za pomocą wzornika może być jednak problematyczny, z takich względów jak różne właściwości optyczne papieru i betonu, różnice w kolorystyce wydruków czy subiektywność ludzkiego oka [19]. Dodatkowo należy wziąć pod uwagę, iż przykładowo dla wzornika koloru CIB zmiana poziomu parametru jasności (*lightness*) nie jest liniowa między poszczególnymi poziomami szarości wzornika.



Rys. 4.5. Poziom jasności L (składowa barwy w systemie CIELAB) poszczególnych obszarów wzornika CIB [19]

Pomiar kolorymetrem

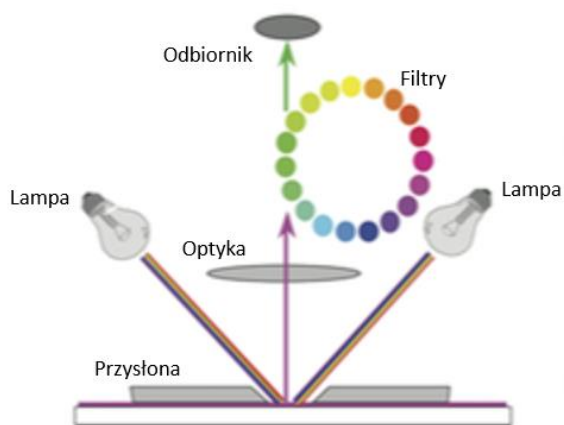
Popularnymi urządzeniami do badania koloru powierzchni są kolorymetry [67]. Urządzenie te składa się z emitera światła, odbiornika oraz filtrów. Światło pada na powierzchnię pod odpowiednim kątem, a następnie jego ilość jest odczytywana przez odbiornik. Zanim jednak światło dotrze do odbiornika, przechodzi przez filtr - niebieski, zielony lub czerwony. Dzięki takiemu pomiarowi można określić ilość światła odpowiadającą składowej czerwonej, zielonej i niebieskiej. Do popularnych układów geometrycznych charakteryzowanych przez kąt między emiterem światła i odbiornikiem należy układ $0^\circ/45^\circ$, gdzie lampy są ustawione pod kątem 45 stopni w stosunku do powierzchni próbki, a odbiornik jest do niej prostopadły. Przy tym układzie geometrycznym pomiar może być zakłócony przez połysk powierzchni. Innym popularnym układem jest układ geometryczny $d/8$, zwany także geometrią sferyczną [68]. W tym układzie próbka jest oświetlona światłem rozproszonym, a pomiar następuje pod kątem 8 stopni. Taki układ w tzw. wariacie *spin* [68] pozwala na uniezależnienie pomiaru barwy od połysku powierzchni. Minusem badania powierzchni za pomocą kolorymetrów jest niewielka powierzchnia pomiarów, rzędu kilku centymetrów kwadratowych [19].



Rys. 4.6. Schemat działania kolorymetru w układzie geometrycznym 0/45 [67]

Pomiar spektrofotometrem

Podobną zasadę działania mają urządzenia zwane spektrofotometrami [67]. Ich główną różnicą w stosunku do kolorymetrów jest badanie odbicia całego spektrum światła przez próbkę, zamiast jego trzech składowych. Dzięki temu możliwe jest dla każdej próbki wykonanie wykresu ilości odbitego światła w zależności od długości fali. Podobnie jak kolorymetry, spektrofotometry mogą badać jednocześnie powierzchnię o wielkości kilku centymetrów kwadratowych. Jednocześnie układy geometryczne, odpowiadające kątowi między emitерem światła i odbiornikiem, są analogiczne jak w kolorymetrach.



Rys. 4.7. Schemat działania spektrofotometru w układzie geometrycznym 0/45 [67]

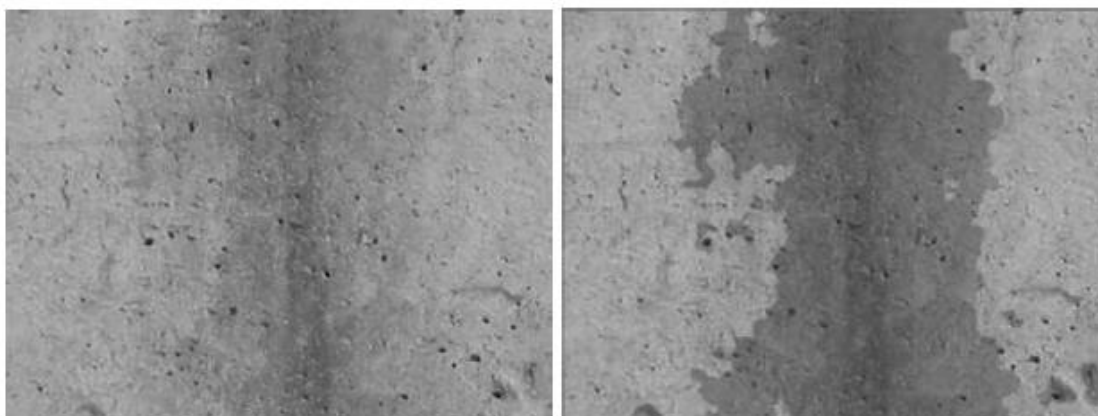
Analiza fotografii

Inną metodą określania kolorystyki powierzchni jest zastosowanie analizy fotografii powierzchni. W normalnych warunkach uzyskany kolor będzie w dużej mierze zależny od zastanych warunków oświetleniowych. Aby wyeliminować wpływ warunków oświetleniowych na odczytany kolor można zastosować metodę zwaną GTM-LMDC [19]. Polega ona, na wykonaniu fotografii powierzchni oraz dokonaniu spektrofotometrem

pomiarów w kilku punktach powierzchni. Następnie algorytm dokonuje korekcji barwy fotografii w oparciu o dane uzyskane ze spektrofotometru. Kolory na zdjęciach poddanych korekcji kolorystycznej można bezpośrednio porównywać między sobą.

Metoda VIRD

Innym sposobem oceny kolorystyki jest ocena jednorodności kolorystyki powierzchni betonowej z wykorzystaniem metody VIRD [69]. W pierwszym kroku wykonuje się zdjęcie powierzchni. Następnie za pomocą technik komputerowej analizy obrazu dokonuje się segmentacji powierzchni na obszary o podobnej kolorystyce. Każdy piksel obrazu jest traktowany jako węzeł w grafie. Między sąsiednimi pikselami oblicza się różnicę kolorystyczną w przestrzeni barw RGB. Piksele o zbliżonych wartościach koloru grupowane są w osobnym klastrze, następnie definiuje się próg odchylenia koloru. Obszary, których wartości RGB odbiegają od ustalonej normy o więcej niż wartość progowa, klasyfikowane są jako przebarwienia.



Rys. 4.8. Obszar przebarwień na powierzchni betonu zidentyfikowany przy pomocy metody VIRD [69]

Ocena przebarwień za pomocą analizy histogramu

Kolejną metodą stosowaną do oceny przebarwień jest metoda analizy histogramu [19, 70]. Polega ona na analizie kształtu histogramu fotografii powierzchni betonu. Przed analizą kolory na fotografii są sprowadzane do skali szarości. Sprawdzając czy odchylenie standardowe histogramu przekracza wcześniej ustaloną wartość graniczną, określa się czy sfotografowana powierzchnia zawiera w sobie obszary zawierające przebarwienia.

Tab. 4.2 zawiera zestawienie wymienionych metod badawczych wraz z opisem ich najważniejszych cech.

Tab. 4.2. Zestawienie metod oceny kolorystyki

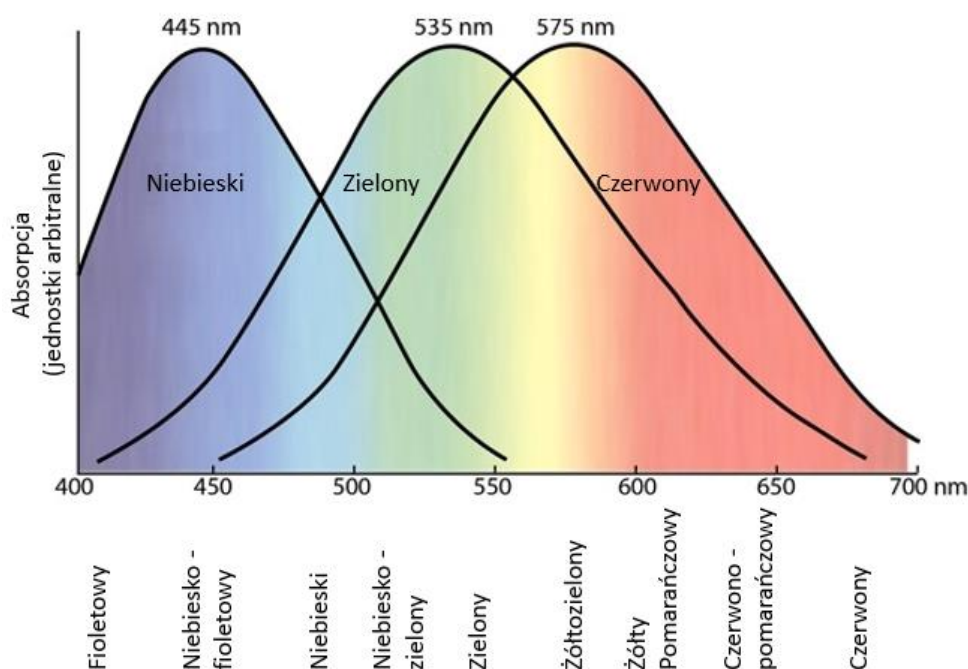
Nazwa metody	Przenośność	Metoda nieniszcząca	Bezpośrednie badanie koloru	Ocena ilościowa	Ograniczenia
kolorymetria w geometrii 0/45	TAK	TAK	TAK	TAK	niewielkie pole pomiaru, wrażliwość na połysk
kolorymetria w geometrii d/8	TAK	TAK	TAK	TAK	niewielkie pole pomiaru
spektrofotometr w geometrii d/8	TAK	TAK	TAK	TAK	niewielkie pole pomiaru
spektrofotometr w geometrii 0/45	TAK	TAK	TAK	TAK	niewielkie pole pomiaru, wrażliwość na połysk
ocena przebarwień za pomocą analizy histogramu	TAK	TAK	NIE	TAK	nie wykrywa niewielkich, ale intensywnych przebarwień
metoda VIRD	TAK	TAK	NIE	TAK	brak możliwości porównania powierzchni między sobą
metoda GTM-LMDC	TAK	TAK	NIE	TAK	konieczność dodatkowych pomiarów spektrofotometrem
wzornik CIB	TAK	TAK	NIE	NIE	duża zależność od osoby oceniającej

5. Czynniki wpływające na wizualną ocenę kolorystyki betonu

Istotnym czynnikiem wpływającym na ocenę powierzchni, w szczególności ocenę kolorystyki, jest oświetlenie. Z tego powodu w niniejszym rozdziale opisana została budowa ludzkiego oka w kontekście postrzegania barw, omówione zostały różne źródła oświetlenia, a także różne sposoby opisu barwy - przestrzenie barw oraz metody oceny podobieństwa barw.

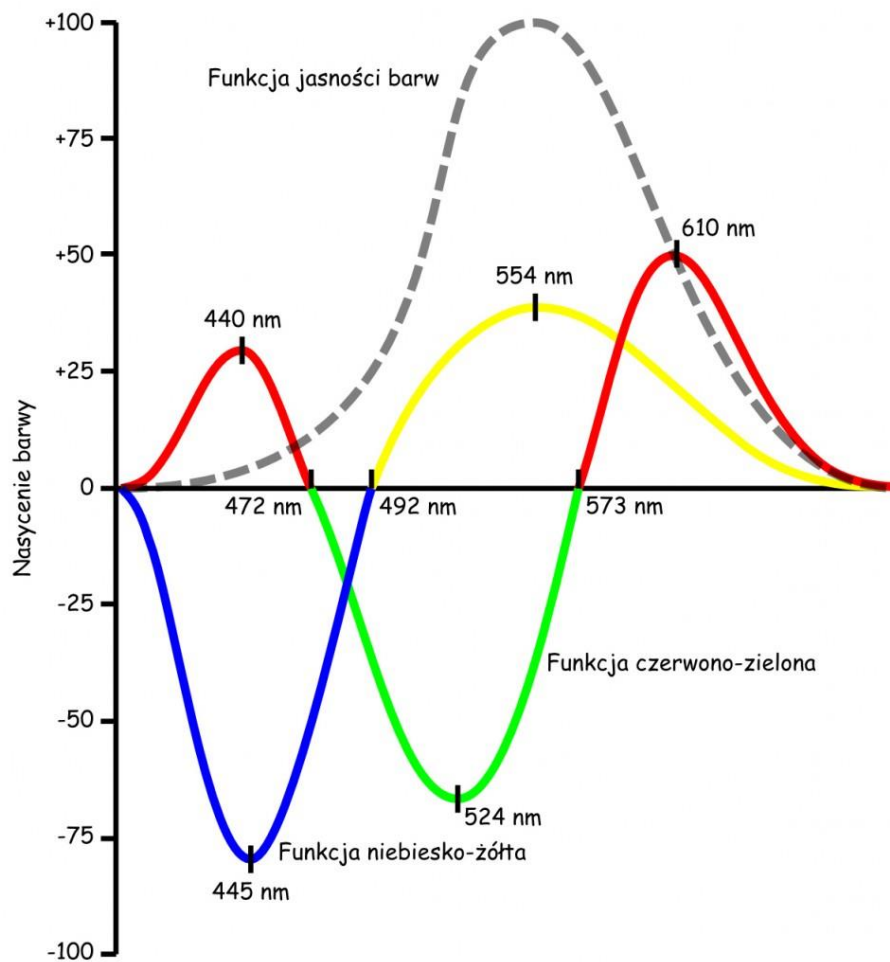
5.1. Budowa ludzkiego oka

Ludzkie oko składa się z kilku rodzajów receptorów, które reagują z różnym nasileniem w zależności od długości fali świetlnej. Wśród nich możemy wyróżnić pręciki które odpowiadają za widzenie monochromatyczne w warunkach słabego oświetlenia (np. w nocy) oraz trzy rodzaje czopków. Pierwszym, jest czopek reagujący najmocniej na światło o długości fali ok 575 nm, umownie zwany czerwonym (*Red - R*) lub długim (*Long - L*). Kolejnym jest czopek reagujący najmocniej na światło o długości ok. 535 nm umownie zwany zielonym (*Green - G*), lub średnim (*Middle - M*). Ostatnim rodzajem receptorów jest czopek zwany niebieskim (*Blue - B*) lub krótkim (*Short - S*). Zakres czułości poszczególnych czopków pokazano na Rys. 5.1. Należy mieć na uwadze, iż nazwy czopków nie mają związku z ich fizycznym rozmiarem, a z długością odbieranej fali świetlnej [70]. Poszczególne rodzaje czopków nie są reprezentowane równolicznie w siatkówce ludzkiego oka. Najmniej jest w oku czopków B, stanowią one zaledwie 5-6% wszystkich czopków. Stosunek czopków R do G jest zmienny w zależności od człowieka i zwykle wynosi od 1,9:1 do 16,5:1 [70].

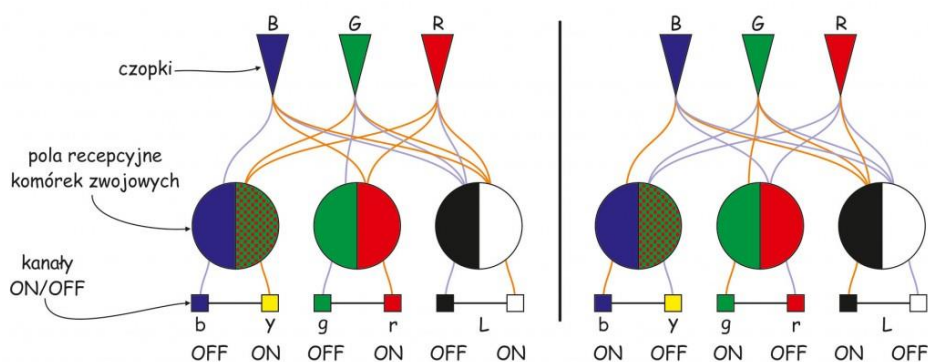


Rys. 5.1. Zakres czułości poszczególnych czopków w oku ludzkim, źródło: arizona.edu

Innym interesującym aspektem jest sposób przetwarzania sygnałów docierających z receptorów do mózgu przez komórki zwojowe. Odpowiadają one za przekazywanie sygnału do ciała kolankowatego bocznego (LGN), które znajduje się w połowie drogi między siatkówką a korą mózgową. Sposób ich działania powoduje, że człowiek widzi jako przeciwstawne barwy czerwoną i zieloną, niebieską i żółtą oraz niską i wysoką luminancję. Rys. 5.2 przedstawia empirycznie otrzymany wykres zależności nasycenia barw żółtą, zieloną, czerwoną i niebieską, a także postrzeganą jasność barw w zależności od długości fali świetlnej. Rys. 5.3 przedstawia natomiast graficzną ilustrację mechanizmu powstawania opozycyjnych barw na etapie przechodzenia sygnału przez komórki zwojowe.



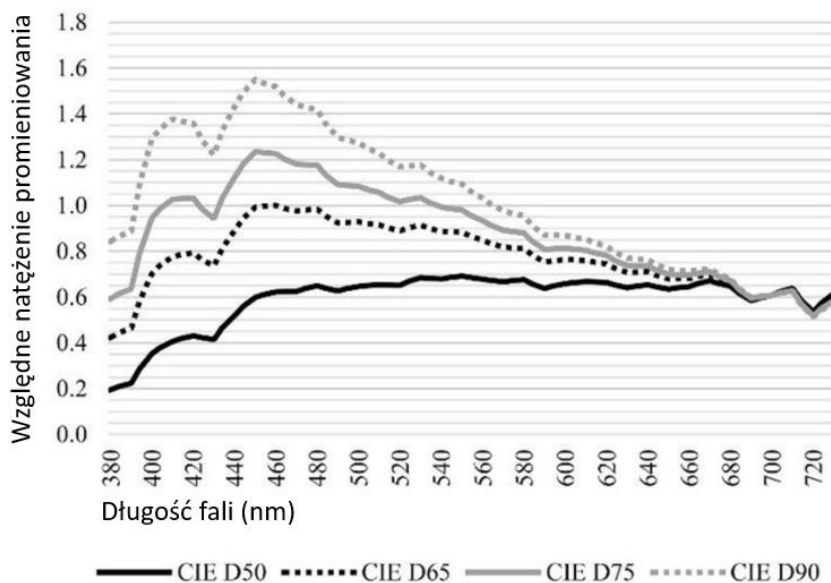
Rys. 5.2. Zależność nasycenia barw żółtą, zieloną, czerwoną i niebieską, a także postrzeganą jasność barw w zależności od długości fali świetlnej [71]



Rys. 5.3. Schemat kombinacji pobudzeń i pól recepcyjnych komórek zwojowych [71]

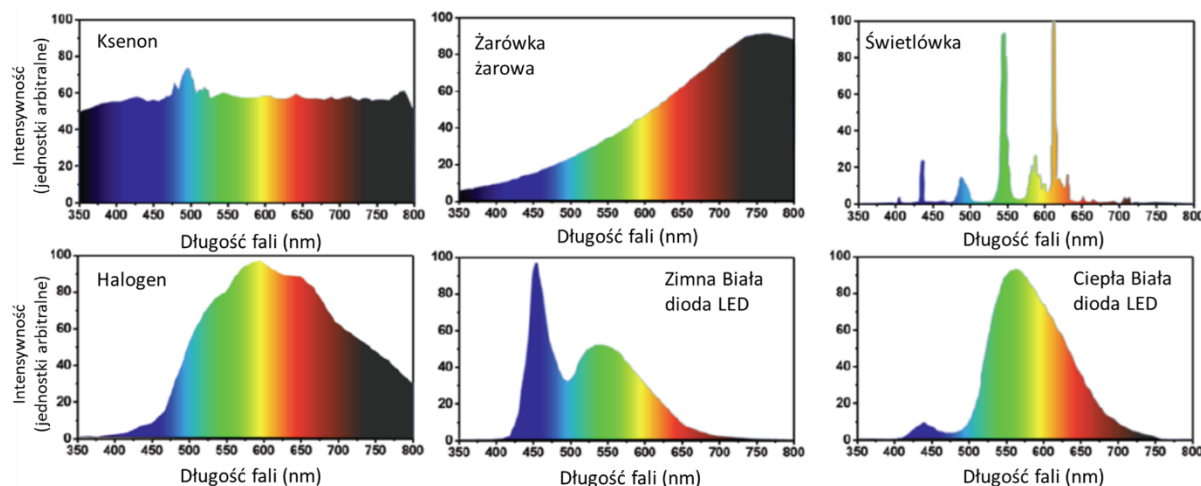
5.2. Źródła oświetlenia

Biorąc pod uwagę fakt, iż różne rodzaje czopków różnie reagują na określone długości fali świetlnej, można dojść do wniosku, że istotnym czynnikiem wpływającym na kolorystykę danego przedmiotu jest charakterystyka światła jakim jest on oświetlany. Jako punkt wyjścia w określeniu standardowych warunków oświetleniowych można przyjąć światło słoneczne. Należy jednak wziąć pod uwagę, że spektrum światła słonecznego może się różnić w zależności od pokrywy chmur [72] czy pory dnia [73]. Na Rys. 5.4 przedstawiono rozkład spektrum fal dla wybranych standardów określonych przez CIE. Dla przykładu światło D50 odpowiada charakterystyce zachmurzonego nieba nad Wielką Brytanią i Skandynawią, światło D65 odpowiada średniej charakterystyce światła słonecznego nad krajami takimi jak Szwajcaria, Niemcy czy Polska, z kolei światło D90 odpowiada bezchmurnemu niebu południowej Europy, np. Grecji [72].



Rys. 5.4. Rozkład spektrum fal dla wybranych standardów określonych przez CIE [72]

Sztuczne źródła oświetlenia można także scharakteryzować pod kątem rozkładu spektrum emitowanych fal. Dla przykładu typowe białe światło LED posiada wyraźny pik w obrębie długości światła odpowiadającej światłu niebieskiemu. Przykłady rozkładu spektrum fal emitowanych dla różnych, sztucznych źródeł światła pokazano na Rys. 5.5.



Rys. 5.5. Rozkładu spektrum emitowanych fal dla różnych sztucznych źródeł światła [74]

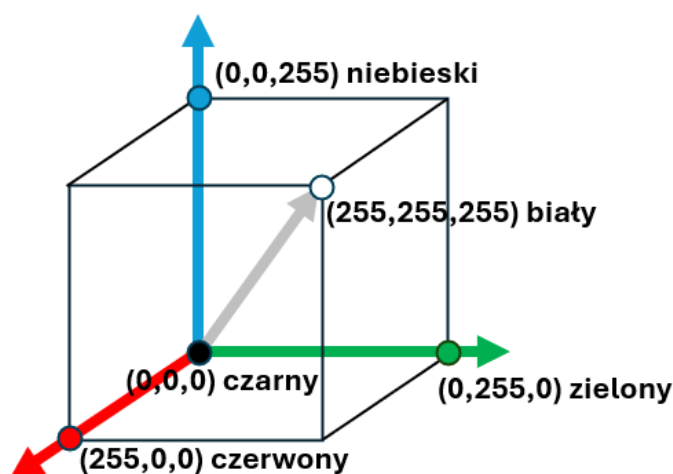
Biorąc powyższe pod uwagę, wraz ze zmianą spektrum światła oświetlającego daną powierzchnię, zmienia się też spektrum światła odbitego od danego przedmiotu docierające do oka obserwatora. Ludzki mózg jest jednak w stanie w pewnym stopniu przystosować się do różnych typów oświetlenia korzystając z takich założeń jak to, że najjaśniejszy kolor powinien być biały a cała kolorystyka sceny powinna być neutralna [75]. Zjawisko opisujące fakt, iż dwa różne źródła światła o odmiennej charakterystyce widmowej, mogą być odbierane jako mające taki sam kolor, nazywa się metameryzmem oświetlenia (*illuminant metamerism*). Z kolei zjawisko, w którym to samo źródło światła może powodować różną percepcję koloru u różnych obserwatorów nazywane jest metameryzmem obserwatora (*observer metamerism*). W tym kontekście należy odpowiedzieć na pytanie, kiedy można uznać kolor danych powierzchni za taki sam. W najprostszym przypadku, kiedy charakterystyka widmowa światła odbitego od dwóch powierzchni jest identyczna (na przykład przy badaniu spektrofotometrem), możemy założyć, że powierzchnie te będą miały identyczny kolor niezależnie od zmiany warunków oświetleniowych i obserwatora. Jeśli jednak krzywe są odmienne, ale dla danego obserwatora (np. ustandaryzowanego obserwatora według CIE 1931 pod kątem 2 stopni) mierzony kolor jest identyczny w danym zapisie barw, kolory powinny być zgodne dla obserwatorów o podobnych charakterystykach. Z kolei, jeśli kolory są podobne, lecz nie identyczne, dla danego

obserwatora (kąta pola widzenia), wraz ze zmianą kąta widzenia różnice w kolorach obserwowanych próbek mogą się powiększyć [75].

5.3. Przestrzeń barw

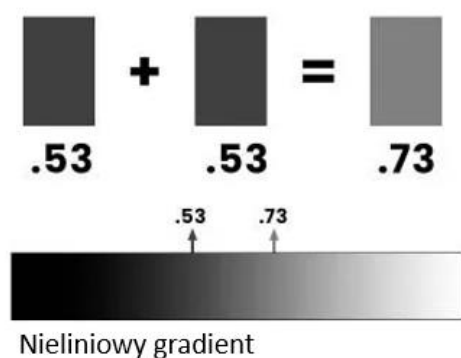
Aby móc omówić systemy obliczania podobieństwa kolorów, należy w pierwszej kolejności przytoczyć różne systemy opisu barw. Ze względu na falową naturę światła, rzeczywista przestrzeń kolorów ma charakter ciągły. Mówi o tym pierwsze prawo Grassmanna zwane zasadą ciągłości. Jednak by móc efektywnie opisywać kolory na potrzeby poligrafii czy wyświetlania obrazów na monitorach, zostały stworzone różne modele barw. Zgodnie z opisanym wcześniej sposobem percepcji kolorów przez układ oko-mózg, do poprawnego opisu barwy potrzebne są modele posiadające trzy składowe. Wynika to z faktu, że zarówno na etapie zbierania informacji, w oku występują trzy rodzaje receptorów, jak i na etapie przetwarzania informacji działają trzy rodzaje pól recepcyjnych komórek zwojowych. Powiązane jest to z trzecim prawem Grassmanna, które mówi, że dowolną barwę można przedstawić za pomocą trzech liniowo niezależnych barw.

Jednym z popularnych modeli barw opartych na trzecim prawie Grassmanna jest model RGB [76]. Barwy w tym modelu powstają przez zmieszanie trzech barw: czerwonego - R, zielonego - G i niebieskiego - B. Wartość każdej ze składowych może zawierać się w przedziale 0-255. Model RGB jest modelem addytywnym, co oznacza, że przy maksymalnej wartości każdego z trzech parametrów otrzymamy barwę białą, a przy zerowej - czarną.



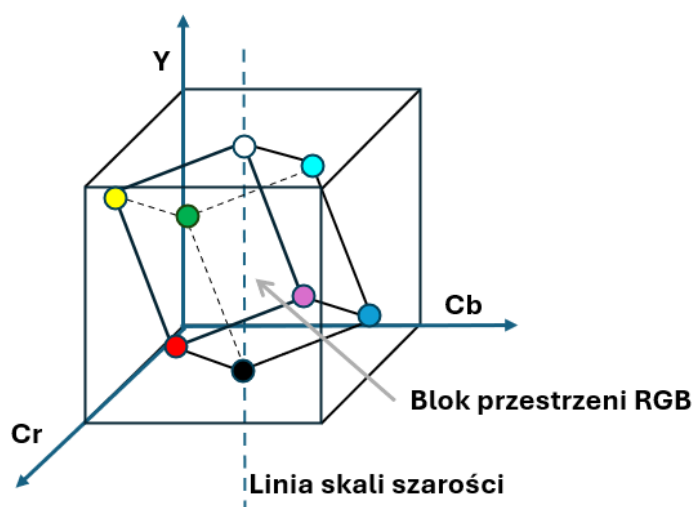
Rys. 5.6. Wizualizacja barw w przestrzeni RGB (opracowanie własne)

Istnieją także pochodne modelu RGB powstałe, aby lepiej sprostać specyficznym wymagom technicznym. Jedną z takich pochodnych jest model sRGB opracowany w 1996 roku przy współpracy firm HP i Microsoft. Ze względu na specyfikę działania wyświetlaczy, jest to model nieliniowy, to znaczy, że po zsumowaniu dwóch barw o identycznym odcieniu szarości, nie otrzymamy koloru dwukrotnie ciemniejszego (patrz Rys. 5.7). Istotny jest także fakt, iż model sRGB jest często domyślnym modelem używanym przez cyfrowe aparaty fotograficzne oraz wyświetlacze. Z tego względu w dalszej części pracy, kiedy będzie mowa o przestrzeni RGB, będzie ona oznaczała przestrzeń sRGB jako domyślna dla aparatów cyfrowych. Model RGB i jego pochodne znajdują szerokie zastosowanie w wyświetlaczach LCD oraz fotografii cyfrowej.



Rys. 5.7. Nieliniowy sposób sumowania barw w modelu sRGB [77]

Kolejnym modelem jest model YCbCr [76]. Model ten powstał, aby efektywnie móc przesyłać obraz wideo. Stanowi on przekształcenie modelu RGB, gdzie Y odpowiada za jasność (*luminance*), z kolei składowe Cb i Cr odpowiadają za składowe kolorystyczne.

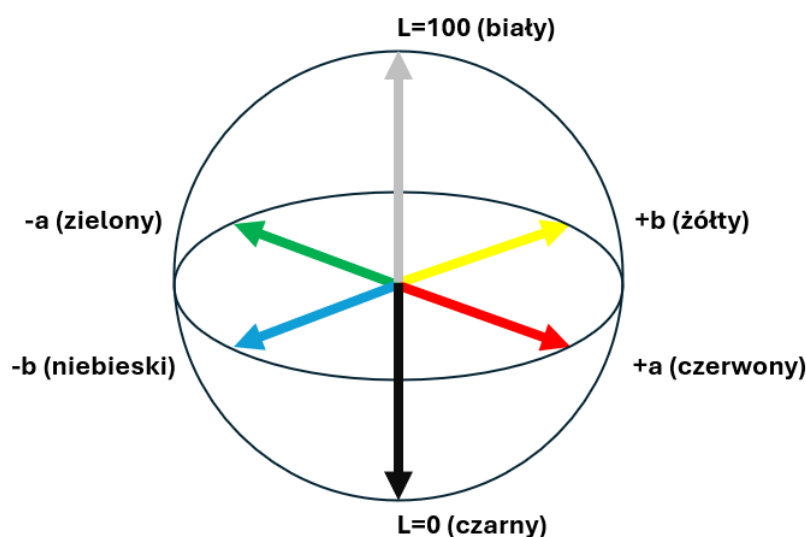


Rys. 5.8. Wizualizacja barw w przestrzeni YCbCr (opracowanie własne)

Innym modelem jest ustanowiony w 1931 roku przez CIE model XYZ zwany także CIEXYZ. Składa się on z trzech składowych X, Y oraz Z, gdzie Y odpowiada jasności (*luminance*), a X oraz Z chromatyczności. Zakres wartości współrzędnych w przestrzeni XYZ jest teoretycznie nieskończony, jednak nie wszystkie wartości mają odzwierciedlenie w kolorach widzianych przez człowieka.

Popularną przestrzenią barw często używaną przez spektrofotometry jest przestrzeń CIELAB która jest matematyczną modyfikacją przestrzeni XYZ [78]. W tym modelu barw, współrzędna L określa jasność, gdzie 0 odpowiada czerni, a 100 bieli. Współrzędne a oraz b odpowiadające za chromatyczność mogą przyjmować wartości zarówno ujemne jak i dodatnie. Dodatnie wartości składowej a oznaczają udział barwy czerwonej, zaś ujemne, udział barwy zielonej. Z kolei dodatnie wartości składowej b oznaczają udział barwy żółtej, z kolei ujemne - udział barwy niebieskiej. Struktura taka dobrze odpowiada sposobowi, w jaki informacja o kolorze przetwarzana jest na drodze do mózgu.

Przestrzeń barw CIELAB została zdefiniowana tak, aby odpowiadać ludzkiej percepcji kolorów. Przy projektowaniu tej przestrzeni barw założono, że barwy znajdujące się w jednakowej odległości euklidesowej będą postrzegane przez obserwatora jako jednakowo różniące się od siebie.



Rys. 5.9. Wizualizacja barw w przestrzeni CIELAB (opracowanie własne)

5.4. Obliczanie różnicy kolorystycznej

Istotną kwestią podczas rozważań nad oceną kolorystyki powierzchni jest sposób w jaki obliczane jest podobieństwo między dwoma kolorami. Podobieństwo to można nazwać odległością kolorystyczną, różnicą kolorystyczną czy odchyleniem kolorystycznym. Do różnych systemów barw powstały odpowiednie wzory mające naśladować wrażliwość ludzi w różnych obszarach przestrzeni barw. Najczęstszym oznaczeniem różnicy kolorystycznej jest parametr ΔE , choć może to się różnić w zależności od autora i stosowanej przestrzeni barw. W części praktycznej niniejszej pracy stosowane będzie oznaczenie ΔE z podaną w nawiasie używaną przestrzenią barw.

5.4.1. Obliczanie różnic koloru w przestrzeni sRGB

Najprostszym podejściem w wyznaczaniu podobieństw kolorów jest obliczenie dystansu euklidesowego między kolorami. W teorii, im większy dystans, tym kolory są mniej podobne do siebie. Dla modelu sRGB podobieństwo wyznaczone dystansem euklidesowym wygląda następująco:

$$dystans = \sqrt{(R_2 - R_1)^2 + (G_2 - G_1)^2 + (B_2 - B_1)^2} \quad (5.1)$$

Zauważono jednak, że ludzki mózg ma tendencję do różnego określania podobieństwa kolorów w zależności od koloru. Przykładowo, dla obszaru barwy żółtej, obserwatorzy są mniej czuli na różnice kolorystyczne niż w przypadku innych barw [75]. Z tego powodu liniowy dystans między danymi kolorami w przestrzeni sRGB może nie odpowiadać ludzkiej percepcji koloru. Na bazie doświadczeń opracowano odpowiednie modyfikacje dystansu euklidesowego. Pierwsza z nich jest dystansem euklidesowym z dodanymi wagami ustalonymi z wzięciem pod uwagę średniej wartości barwy czerwonej.

$$\begin{cases} \sqrt{2\Delta R^2 + 4\Delta G^2 + 3\Delta B^2}, & \bar{R} < 128 \\ \sqrt{3\Delta R^2 + 4\Delta G^2 + 2\Delta B^2}, & \bar{R} \geq 128 \end{cases} \quad (5.2)$$
$$\begin{aligned} \Delta R &= R_1 - R_2 \\ \Delta G &= G_1 - G_2 \\ \Delta B &= B_1 - B_2 \\ \bar{R} &= \frac{1}{2}(R_1 + R_2) \end{aligned}$$

Inną modyfikacją używaną komercyjnie [79] jest dystans euklidesowy z wagami zmieniającymi się płynnie wraz ze zmianą średniej wartości barwy czerwonej.

$$\Delta C = \sqrt{\left(2 + \frac{\bar{r}}{256}\right) \times \Delta R^2 + 4 \times \Delta G^2 + \left(2 + \frac{255 - \bar{r}}{256}\right) \times \Delta B^2} \quad (5.3)$$

$$\bar{r} = \frac{C_{1,R} + C_{2,R}}{2}$$

$$\Delta R = C_{1,R} - C_{2,R}$$

$$\Delta G = C_{1,G} - C_{2,G}$$

$$\Delta B = C_{1,B} - C_{2,B}$$

Gdzie:

$C_{1,R}$ - Średnia wartość parametru R dla powierzchni nr 1

$C_{1,G}$ - Średnia wartość parametru G dla powierzchni nr 1

$C_{1,B}$ - Średnia wartość parametru B dla powierzchni nr 1

$C_{2,R}$ - Średnia wartość parametru R dla powierzchni nr 2

$C_{2,G}$ - Średnia wartość parametru G dla powierzchni nr 2

$C_{2,B}$ - Średnia wartość parametru B dla powierzchni nr 2

5.4.2. Obliczanie różnic koloru w przestrzeni CIELAB

Założeniem projektantów przestrzeni CIELAB było to, aby kolory o jednakowym dystansie euklidesowym były jednakowo do siebie podobne dla obserwatora. Podobieństwo kolorów w przestrzeni CIELAB jest oparte o obliczanie dystansu euklidesowego. Jako miarę podobieństwa stosuje się parametr ΔE . Obliczany jest on za pomocą wzoru:

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2} \quad (5.4)$$

Formuła ta jest także zalecana przez autorów raportu technicznego *CEN/TR 15739:2008* [27] dla obliczania różnic w kolorystyce powierzchni betonowych przy pomiarach spektrofotometrycznych. Badania wykazały [80], że tak obliczone podobieństwo kolorów można interpretować w sposób pokazany w Tab. 5.1.

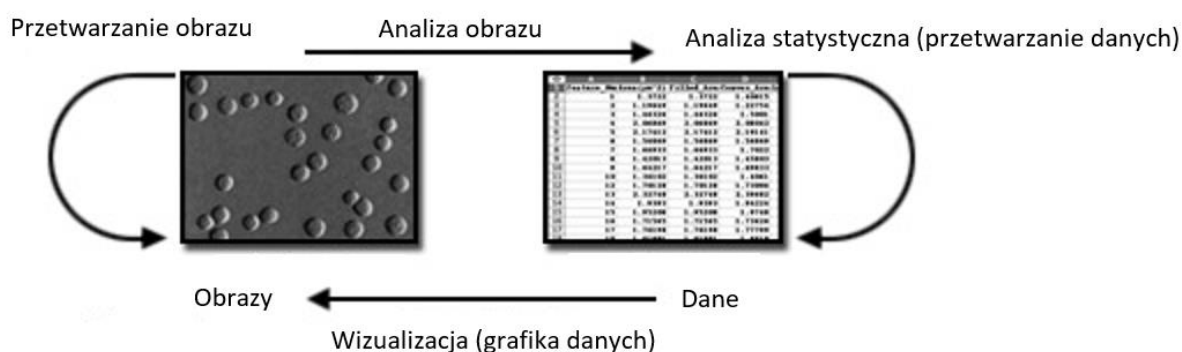
Tab. 5.1. Interpretacja różnicy kolorystycznej ΔE (CIELAB) (opracowano na podstawie [80])

ΔE	Wynik pomiaru - interpretacja
0,0 - 1,0	różnica niezauważalna
1,0 - 2,0	różnica dostrzegalna tylko dla doświadczonego obserwatora
2,0 - 3,5	różnica dostrzegalna również przez niedoświadczonego obserwatora
3,5 - 5,0	zauważalna wyraźna różnica
powyżej 5,0	zauważalna duża różnica (interpretowana jako różne barwy)

6. Metody komputerowej analizy obrazu i przetwarzania obrazów cyfrowych

6.1. Przetwarzanie obrazów cyfrowych

Przetwarzanie obrazów cyfrowych (*digital image processing*) może być rozumiane jako przetwarzanie obrazów cyfrowych za pomocą komputerów cyfrowych [81] z wykorzystaniem algorytmów i modeli matematycznych. Z kolei jako obraz cyfrowy rozumiemy taki obraz, który można podzielić na skończoną liczbę dyskretnych wartości. Każdy podstawowy element obrazu cyfrowego posiada swoje położenie oraz wartość, która może być liczbą (obraz w skali szarości) lub wektorem (obraz kolorowy). Takie podstawowe elementy składowe nazywamy pikselami. Dodatkowo należy wyróżnić terminy takie jak komputerowa analiza obrazu (*image analysis*) oraz rozpoznawanie obrazów (*computer vision*). Wszystkie te pojęcia odnoszą się do przetwarzania i analizy obrazów cyfrowych. Możemy je rozróżnić, patrząc na rezultaty poszczególnych operacji na obrazie. Przyjmuje się, że dla przetwarzania obrazów cyfrowych zarówno na wejściu jak i na wyjściu otrzymujemy obraz, podczas gdy dla komputerowej analizy obrazu czy rozpoznawania obrazów wynikiem może być na przykład zestaw parametrów opisujących obraz [81, 82]. Brakuje jednak jednoznacznego rozróżnienia obu technik. Na przykład, operacje prowadzące do ekstrakcji cech z obrazów cyfrowych mogą być zaliczane zarówno do komputerowej analizy obrazu, jak i do przetwarzania obrazów cyfrowych [81].



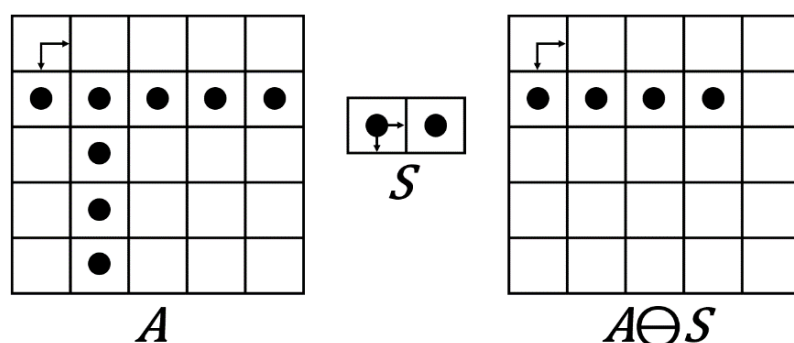
Rys. 6.1. Zależność między przetwarzaniem obrazów cyfrowych (*Image Processing*) a komputerową analizą obrazu (*Image Analysis*) [81]

6.2. Operacje morfologiczne na obrazie

Przekształcenia morfologiczne obrazu to operacje, które prowadzą do zmiany formy lub struktury obiektu. Do najpowszechniej używanych należą Erozja (*Erosion*), Rozszerzenie (*Dilation*), Otwieranie (*Opening*) oraz Zamykanie (*Closing*). Operacje te mogą być również określane jako morfologia matematyczna [83, 84]. Zestawienie kilku przekształceń w określonej kolejności może być użyte do bardziej zaawansowanej analizy obiektów w obrazie cyfrowym, jak na przykład analiza kształtów elementów.

Podstawą przekształceń morfologicznych obrazu jest użycie tak zwanego elementu strukturalnego (*structuring element*). Jest to swojego rodzaju maska, która jest nakładana na oryginalny wzorzec. Dla każdego elementu strukturalnego wyróżniamy punkt centralny, który odpowiada aktualnie rozpatrywanemu pikselowi na obrazie.

Erozja jest operacją polegającą na zmniejszeniu obiektów na obrazie. Polega ona na odejmowaniu wektorowym elementów zbioru, gdzie jeden zbiór jest rozpatrywanym obrazem, a drugi elementem strukturalnym. Wynik erozji jest zbiorem wszystkich elementów x dla których $x + s \in A$ dla każdego $s \in S$, gdzie S jest elementem strukturalnym, z kolei A jest elementem erodowanym. Erozja elementu A przez element S jest oznaczana jako $A \ominus S$ [84].



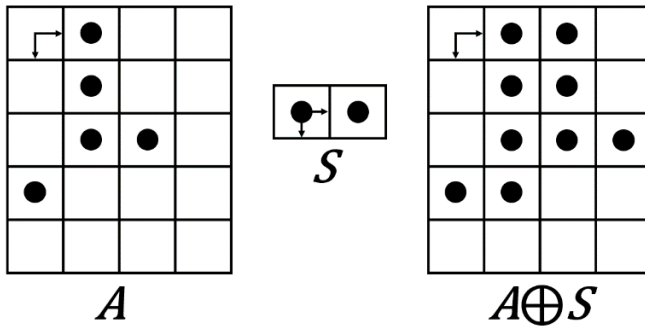
Rys. 6.2. Przykład erozji elementu A przez element S (opracowano na podstawie [84])

Dylatacja (*Dilation*) jest w pewnym sensie odwrotnością erozji. Polega ona na dodawaniu wektorowym elementów zbioru. Tak samo jak w przypadku erozji, pierwszy zbiór jest rozpatrywanym obrazem, a drugi elementem strukturalnym [84]. Dylatacja może być zdefiniowana następująco:

$$A \oplus S = \{c \in E^N \mid c = a + s \text{ dla } a \in A \text{ i } s \in S\} \quad (6.1)$$

gdzie S – element strukturalny,

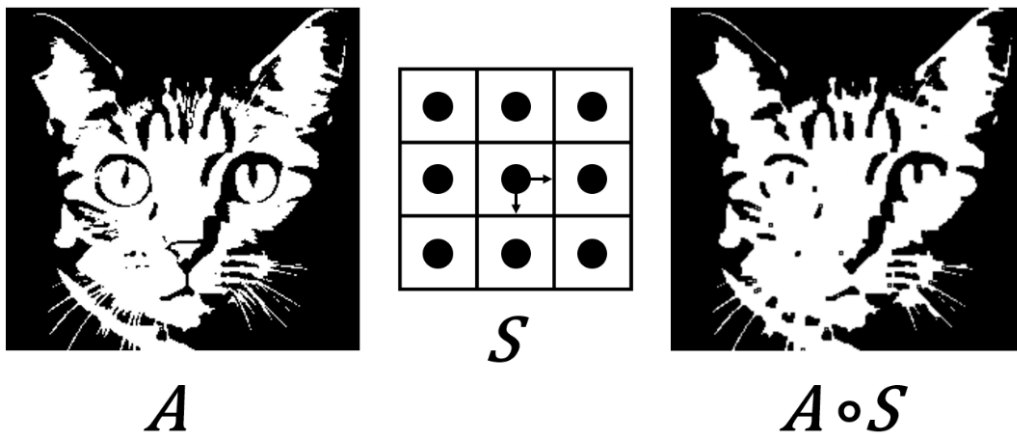
A – element poddawany dylatacji



Rys. 6.3. Przykład dylatacji elementu A przez element S (opracowano na podstawie [84])

Otwieranie jest operacją morfologiczną w której najpierw następuje erozja a następnie dylatacja przez ten sam element strukturalny. Otwieranie definiuje się następująco [84]:

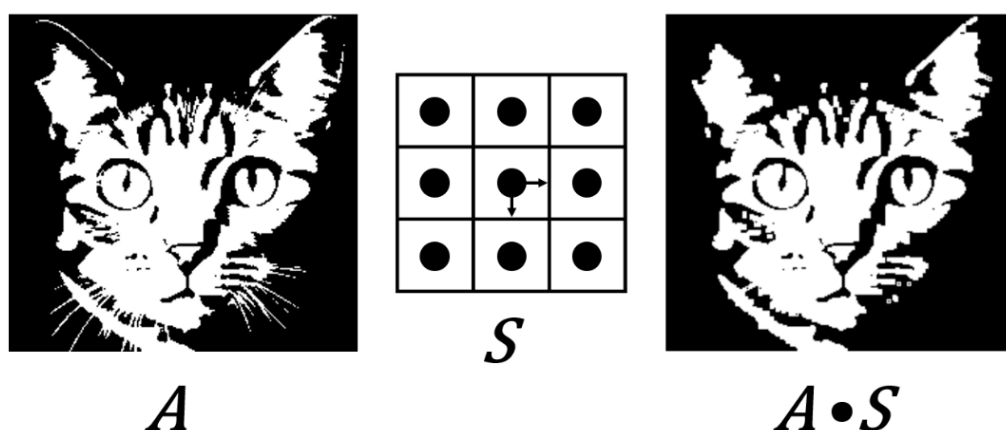
$$A \circ S = (A \ominus S) \oplus S \quad (6.2)$$



Rys. 6.4. Przykład otwarcia elementu A przez element S (opracowano na podstawie [84])

Zamknięcie można przedstawić jako odwrotność otwarcia. W pierwszej kolejności następuje dylatacja elementu A przez element strukturalny, a następnie na wynikowym obrazie dokonuje się erozji tym samym elementem strukturalnym. Zamykanie definiuje się jako [84]:

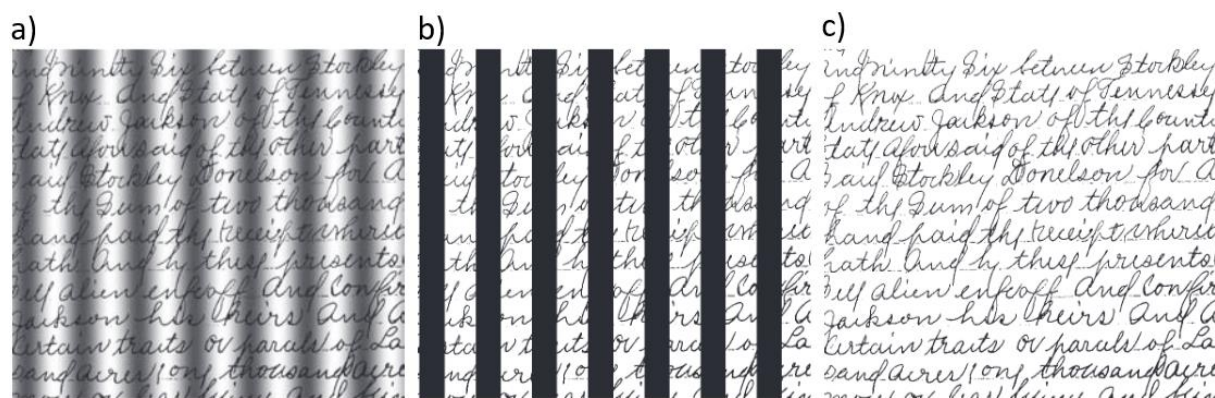
$$A \cdot S = (A \oplus S) \ominus S. \quad (6.3)$$



Rys. 6.5. Przykład zamknięcia elementu A przez element S (opracowano na podstawie [84])

6.3. Algorytmy progowania

Jednym z istotnych etapów często występującym w komputerowym przetwarzaniu obrazu są operacje progowania. Progowanie polega na podziale obrazu w skali szarości na K predefiniowanych klas bazujących na $K-1$ progach segmentacji. W większości przypadków K wynosi 2, w tym wypadku dostajemy jako wynik obraz binarny [85]. Progowanie polega na sprawdzeniu wartości każdego piksela obrazu, aby określić, czy jest on powyżej, czy poniżej ustalonego poziomu progowania. Na tej podstawie piksel jest przyporządkowywany do jednej z dwóch klas — najczęściej oznaczanych jako 0 i 1, lub odpowiednio jako biały i czarny. Podstawowym rodzajem progowania jest tak zwane progowanie globalne, w którym każdy z pikseli jest testowany za pomocą tego samego poziomu progowania. Istnieją metody automatycznego wyznaczania optymalnego progu progowania globalnego. Jedną z nich jest algorytm progowania globalnego Otsu. W przypadku progowania lokalnego, poziom progowania jest ustalany dynamicznie dla każdego piksela lub regionu obrazu, biorąc pod uwagę jego lokalne otoczenie [81, 85, 86]. Wśród algorytmów progowania lokalnego wyróżniamy między innymi algorytmy: Niblack [87], Sauvola [88], Local Otsu [89], Bernsen [90], Feng [91], Singh [92], Contrast [93] czy Bradley Roth [94].



Rys. 6.6. (a) - Obraz tekstu z nałożonym cieniowaniem sinusoidalnym, (b) - Obraz po zastosowaniu progowania globalnego algorytmem Otsu, (c) - Obraz po zastosowaniu progowania lokalnego [81]

CZĘŚĆ PRAKTYCZNA

7. Koncepcja badawcza

7.1. Wstęp

W poprzednich rozdziałach pracy przeprowadzono analizę literatury przedmiotu oraz istniejących wytycznych dotyczących oceny betonu architektonicznego. Na tej podstawie przyjęto, że podstawowymi cechami powierzchni betonu architektonicznego, które należy uwzględnić przy opracowaniu metody oceny, są jej porowatość i kolorystyka. Istotne jest też uwzględnienie wpływu struktury geometrycznej powierzchni na wyniki pomiaru wymienionych cech. Dlatego też części praktycznej pracy skoncentrowano się opracowaniu metody pozwalającej na równoczesne wyznaczenie parametrów charakteryzujących obie te cechy.

Aby udowodnić tezę postawioną w pracy, w części praktycznej skupiono się na dojściu do odpowiedzi na następujące pytania:

- W jakim stopniu przebarwienia i chropowatość wpływają na wynik pomiaru jej porowatości?
- W jakim stopniu porowatość i chropowatość powierzchni wpływają na wynik pomiaru jej kolorystyki?
- Które parametry statystyczne najlepiej charakteryzują porowatość i kolorystykę powierzchni betonu architektonicznego?
- Jakie są optymalne wartości graniczne wybranych parametrów statystycznych dla klasyfikacji powierzchni betonu architektonicznego?

Biorąc pod uwagę analizowane kryteria oceny oraz metody badania cech powierzchni betonu, można dojść do wniosku, że metoda badawcza powinna pozwalać na pomiar niezależny od warunków zewnętrznych, a wynik powinien być w jak najmniejszym stopniu zależny od osoby wykonującej badanie. Metoda badawcza powinna mieć możliwość jednoczesnego określania w sposób ilościowy parametrów charakteryzujących porowatość i kolorystykę. Jednocześnie wynik pomiaru każdego z tych parametrów powinien być w jak najmniejszym stopniu zależny od pozostałych cech powierzchni.

Biorąc pod uwagę analizę literatury oraz doświadczenia z badań prowadzonych w ramach pracy magisterskiej, założono, że opracowana metoda badawcza powinna być oparta o analizę zdjęć

wykonanych w stałych warunkach oświetleniowych, tak aby zapewnić niezależność pomiaru od oświetlenia zewnętrznego.

W tym celu wykonano urządzenie badawcze w postaci prostopadłościanu z otwartą jedną ścianą oraz z otworem na aparat fotograficzny z drugiej strony. Dodatkowo, zamontowano w środku oświetlenie w postaci taśm LED, tak aby zapewnić właściwe warunki oświetleniowe. Po wykonaniu pomiaru, zdjęcia poddano przetwarzaniu oraz analizie obrazu, tak aby na wyjściu otrzymać wartości liczbowe opisujące kolorystykę oraz porowatość badanej powierzchni. W ostatnim etapie pracy zaproponowano i zweryfikowano kryteria oceny powierzchni betonu architektonicznego oparte na obliczonych parametrach. W operacjach przetwarzania obrazu oraz pozostałych obliczeniach zdecydowano się na użycie języka programowania Python, który jest powszechnie używany w zadaniach przetwarzania i analizy obrazu, dzięki licznym, dedykowanym bibliotekom przystosowanym do tego typu zadań jak OpenCV.

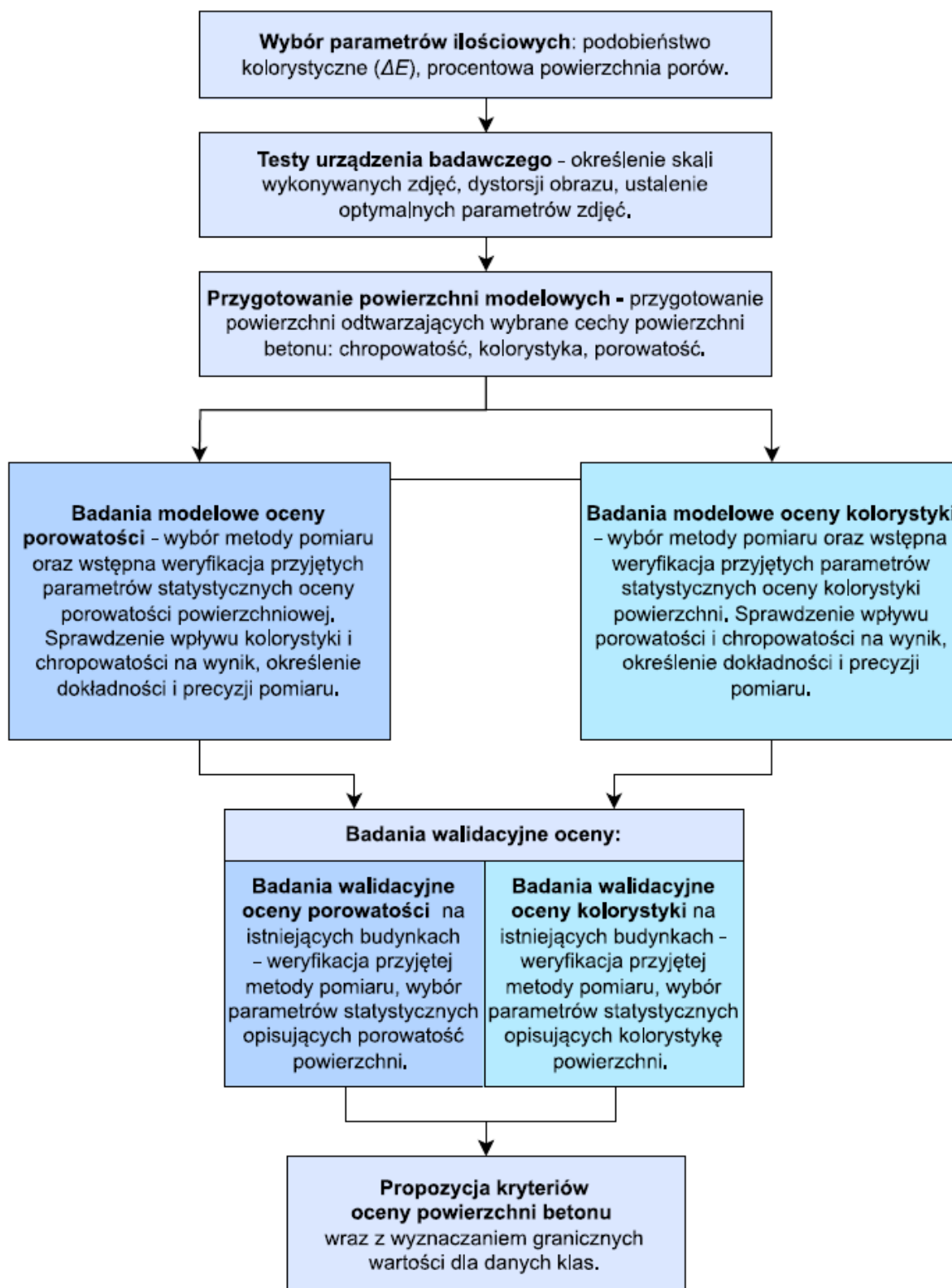
7.2. Plan badań

Badania podzielono na trzy zasadnicze etapy. Na początku skupiono się na opracowaniu i przetestowaniu metod badawczych właściwych dla badania danej cechy powierzchni. Istotnym elementem był właściwy dobór oświetlenia, które miało na celu uwydatnienie badanych cech powierzchni. Ważne było także opracowanie algorytmów obliczeniowych, pozwalających określić wartość danego parametru, na przykład procentowej powierzchni porów niezależnie od chropowatości i przebarwień oraz pomiaru koloru niezależnie od porowatości i chropowatości.

W pierwszym etapie przeprowadzono podstawowe testy urządzenia badawczego, mające na celu dobranie parametrów zdjęć, balansu bieli, sprawdzenie dystorsji oraz obliczenie skali wykonywanych zdjęć, aby w dalszych etapach móc przeliczać liczbę pikseli na milimetry kwadratowe.

Drugim etapem były badania modelowe, przeprowadzone na wcześniej przygotowanych powierzchniach modelowych. Podczas tych badań skoncentrowano się na wyborze optymalnego wariantu obliczeniowego poprzez analizę dokładności, powtarzalności pomiarów oraz stopnia zależności wyniku pomiaru od innych cech powierzchni. W ostatnim etapie badań modelowych sprawdzono parametry statystyczne oceny porowatości i kolorystyki powierzchni. Zastosowanie powierzchni modelowych zapewnia pełną kontrolę nad kluczowymi cechami powierzchni, takimi jak: chropowatość, porowatość oraz kolorystyka. Pozwala to na przeprowadzenie obiektywnych badań, eliminując wpływ potencjalnych zakłóceń, które mogą wystąpić w przypadku badania rzeczywistych powierzchni betonowych.

Przyjęte metody i parametry statystyczne oceny poddano weryfikacji podczas badań walidacyjnych na podstawie których przyjęto kryteria oceny. Szczególny nacisk położono na graniczne wartości parametrów kwalifikujących element do danej klasy powierzchni oraz na dobór parametrów statystycznych opisujących daną cechę powierzchni. Na Rys. 7.1 przedstawiono schemat opisujący kolejne etapy badań.



Rys. 7.1. Schemat opisujący kolejne etapy przeprowadzonych badań

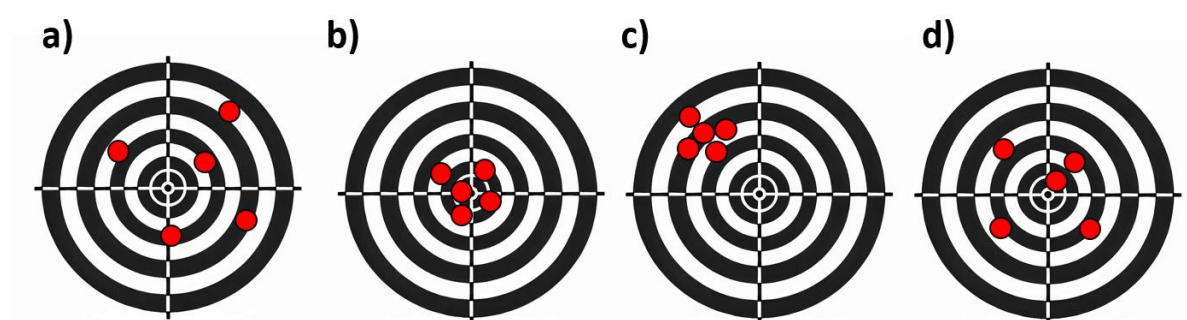
7.3. Kryteria oceny wyników pomiaru

Aby móc dokonać wiarygodnej oceny przydatności metody obliczeniowej, należy w pierwszej kolejności określić dokładność i precyzję pomiaru poszczególnych parametrów wykorzystywanych przy ocenie jakości powierzchni. Dokładność i precyzję pomiaru można zdefiniować w następujący sposób [95].

Dokładność (*accuracy*): Dokładność pomiaru ocenia zgodność wyniku pomiaru z rzeczywistą wartością mierzonej wielkości. Jest miarą pokazującą, jak bardzo wyniki zbliżone są do rzeczywistej wartości mierzonej cechy.

Precyzja (*precision*): Miara ta odnosi się do stopnia powtarzalności wyników pomiarów, gdy są one przeprowadzane w tych samym warunkach. Precyzja jest miarą zmienności (rozproszenia) wyników, wskazuje jak poszczególne wyniki pomiaru różnią się od siebie. Im wyniki są bardziej zbliżone do siebie, tym wyższa jest precyzja pomiaru, niezależnie od ich zgodności z wartością rzeczywistą.

Dokładność i precyzja skupiają się na różnych aspektach pomiaru. Dokładność odnosi się do odchylenia wyników pomiaru od rzeczywistej wartości danej cechy, podczas gdy precyzja mierzy spójność wyników między sobą. Możliwa jest sytuacja, w której pomiar będzie precyzyjny (rozproszenie wyników bardzo małe), lecz mało dokładny (odchylenie od wartości rzeczywistej bardzo duże) i na odwrót. Ideę określania precyzji i dokładności pomiaru przedstawiono na Rys. 7.2.



Rys. 7.2. Zależność między precyzją i dokładnością pomiaru: a) Niska dokładność, niska precyzja; b) Wysoka dokładność, wysoka precyzja; c) Niska dokładność, wysoka precyzja; d) Wysoka dokładność, niska precyzja

Zarówno precyzję jak i dokładność pomiaru można charakteryzować na różne sposoby. W niniejszej pracy przyjęto, że miarą dokładności będzie błąd względny. Błąd względny to stosunek różnicy między zmierzoną wartością, a wartością rzeczywistą do wartości rzeczywistej, wyrażony zazwyczaj w skali procentowej. Błąd względny pozwala ocenić, jak daleko wartości pomiarowe oddalone są od wartości rzeczywistych, dając miarę dokładności pomiaru. Im mniejszy błąd względny tym dokładność pomiaru jest większa. Błąd względny pomiaru można wyrazić następującym wzorem:

$$\text{Błąd względny} = \frac{|x - x_0|}{x} \cdot 100\% \quad (7.1)$$

gdzie:

X - wartość rzeczywista

X_0 - wartość zmierzona

Przy analizie większej liczby wyników pod uwagę będzie brana maksymalna wartość błędu względnego spośród błędów wyznaczonych dla poszczególnych pomiarów.

Z kolei precyzję zmierzono za pomocą współczynnika zmienności (*coefficient of variation*). Jest to miara rozproszenia, definiowana jako stosunek odchylenia standardowego od średniej [96].

$$V = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100\% \quad (7.2)$$

gdzie:

S - odchylenie standardowe

$\bar{x}$ - średnia arytmetyczna

Oceniając wyniki otrzymane z wykorzystaniem poszczególnych wariantów metod badawczych, szukano takich wariantów, gdzie błąd względny oraz współczynnik zmienności są najniższe.

8. Metody, techniki, narzędzia badawcze

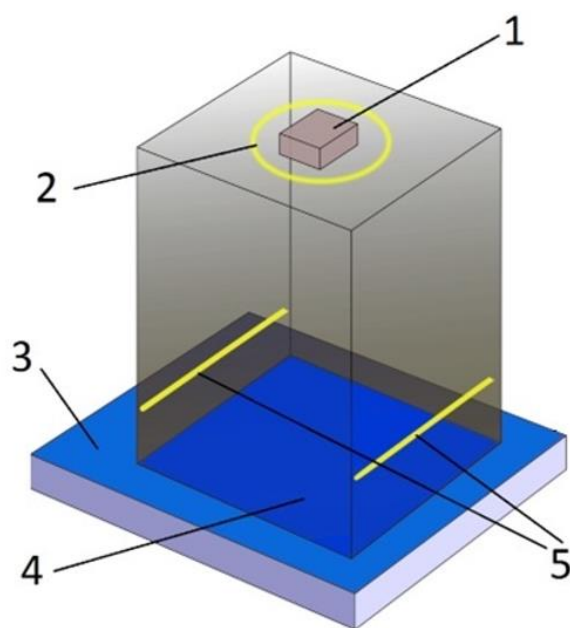
8.1. Urządzenie badawcze

W celu zapewnienia jednakowych warunków oświetleniowych oraz zachowania stałej odległości aparatu od badanego obiektu, na potrzeby pracy skonstruowano urządzenie badawcze w postaci skrzynki z jedną ścianą otwartą, posiadającą otwór i mocowanie aparatu fotograficznego oraz zintegrowane oświetlenie. Urządzenie to jest rozwinięciem urządzenia DARK-BOX skonstruowanego przez autora na potrzeby pracy magisterskiej. Urządzenie składa się z drewnianej skrzynki pomalowanej od środka na kolor czarny. Wewnątrz znajdują się moduły oświetlenia górnego stosowanego w ocenie kolorystyki powierzchni oraz moduły oświetlenia bocznego stosowanego do oceny porowatości. Korpus urządzenia posiada zewnętrzne wymiary 27,5x27,5x40 cm. Dodatkowo, krawędzie otwartej ścianki, które stykają się z powierzchnią betonu wyposażono w uszczelkę o grubości 4 mm w celu minimalizacji ilości światła przedostającego się do wnętrza urządzenia poprzez szczeliny między badaną powierzchnią a krawędziami urządzenia badawczego. Na przeciwległej ścianie znajduje się panel sterujący oświetleniem, a także otwór na aparat fotograficzny wraz z jego mocowaniem, które ma za zadanie utrzymanie aparatu w jednej pozycji. Jest to kluczowe dla zachowania powtarzalności wykonanych zdjęć i odpowiednich warunków oświetlenia badanego obszaru. Ważne jest zapewnienie, że centrum zdjęcia znajduje się w tej samej odległości od każdej z bocznych lamp, co pozwala utrzymać odpowiedni kąt padania światła na badany fragment powierzchni. Dodatkowo, stała odległość aparatu od badanej powierzchni pozwala na właściwe wyskalowanie otrzymanych zdjęć, dając możliwość przeliczenia powierzchni pikseli na zdjęciu na milimetry kwadratowe. Biorąc pod uwagę fakt, iż w przypadku oświetlenia lampami LED, natężenie światła zależy od napięcia prądu, zastosowane oświetlenie podłączono do regulatora napięcia, tak aby zachować stałe napięcie 12 V niezależnie od stanu naładowania akumulatora zasilającego. Do wykonania zdjęć użyto aparatu cyfrowego Lumix DC-LX 100 II. Na Rys. 8.1(b) przedstawiono w sposób schematyczny budowę urządzenia.

a)



b)



Rys. 8.1. Urządzenie DARK-BOX (a) Wygląd zewnętrzny bez zainstalowanego aparatu, (b) Schemat poglądowy budowy urządzenia badawczego: 1 - aparat rejestrujący obraz, 2 - oświetlenie górne, 3 - badana powierzchnia, 4 - ściany urządzenia pokryte czarną, matową farbą, 5 - oświetlenie boczne

8.2. Program i metody badań

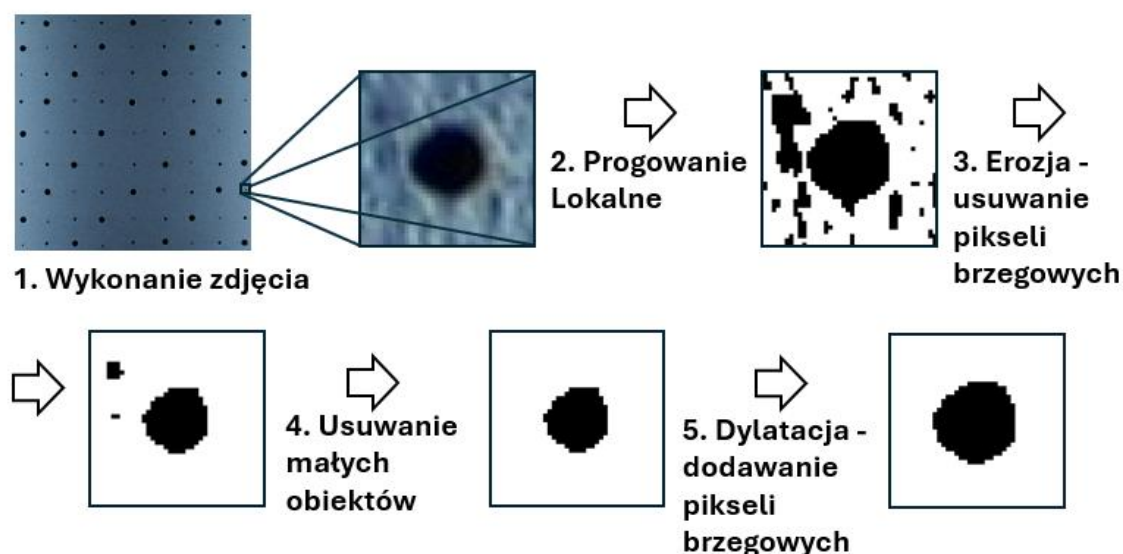
8.2.1. Badanie porowatości powierzchniowej

Biorąc pod uwagę obecnie stosowane metody badania porowatości opisane w rozdziale 4.1, metodą najbardziej pasującą do założonego celu pracy jest automatyczne zliczanie porów za pomocą narzędzi analizy obrazu. Istotnymi etapami wyżej wymienionej metody jest pozyskanie zdjęć powierzchni, obróbka obrazu oraz zliczenie porów. Każdy z tych etapów powinien być odpowiednio zaprojektowany i przetestowany. Ponadto metoda badawcza powinna być zweryfikowana pod kątem wpływu chropowatości i kolorystyki powierzchni na wynik pomiaru.

8.2.1.1. Algorytm pomiaru porowatości powierzchni

W proponowanej metodzie do celów pozyskiwania zdjęć użyto urządzenia DARK-BOX, którego wymiary pozwalają na wykonanie zdjęć powierzchni o wymiarach 15x15 cm. W celu uwydatnienia porów na zdjęciach zastosowano oświetlenie boczne na wysokości 3,5 cm nad powierzchnią - taka wysokość zapewnia zacienienie otworów o stosunku wysokości do szerokości 1:2.

Aby otrzymać informację o powierzchni porów na zdjęciu należy najpierw oddzielić pory od tła, tak aby piksele odpowiadające porom przyjęły wartość 1 (kolor czarny) a tło wartość 0 (kolor biały). W tym celu zastosowano operację progowania lokalnego (Rys. 3-2), a następnie operację erozji (Rys. 3-3), czyli usuwania pikseli brzegowych. W dalszej kolejności usunięto elementy poniżej określonej wielkości (Rys. 3-4). Ostatnim krokiem jest dylatacja obrazu (Rys. 3-5), czyli dodawanie pikseli na brzegach obiektów, tak aby odtworzyć wielkość obiektów zmniejszonych podczas erozji. Celem tak opisanego ciągu operacji morfologicznych jest jak najwierniejsze odwzorowanie porów oraz usunięcie ewentualnego szumu spowodowanego m.in. nierównościami powierzchni.



Rys. 8.2. Schemat proponowanego algorytmu oceny porowatości powierzchni betonu

Kluczowym elementem było dobranie optymalnego algorytmu binaryzacji oraz określenie rozmiaru elementu strukturalnego, wykorzystywanego w operacjach erozji i dylatacji, jak również minimalnej wielkości obiektów usuwanych przed dylatacją.

Ze względu na fakt, że w warunkach oświetlenia bocznego powierzchnia betonu nie jest równomiernie oświetlona, zdecydowano się na zastosowanie algorytmów progowania lokalnego, gdzie wartość progu jest definiowana lokalnie, a nie globalnie. Pozwala to na uwzględnienie lokalnych zmian jasności obrazu oraz umożliwia analizę porowatości również w przypadku obecności przebarwień na powierzchni betonu. W ramach przeprowadzonych badań przeanalizowano efektywność ośmiu algorytmów progowania lokalnego: Niblack [87], Sauvola [88], Local Otsu [89], Bernsen [90], Feng [91], Singh [92], Contrast [93] czy Bradley Roth [94].

8.2.1.2. Ocena porowatości powierzchniowej

Porowatość jest cechą, która została dotychczas najlepiej opisana w sposób ilościowy w wytycznych. Przeanalizowane kryteria, przedstawione w Tab. 3.3, w dużej mierze koncentrują się na specyfikacji maksymalnego udziału porów na danym fragmencie powierzchni, brakuje jednak wytycznych dotyczących sposobu wyboru powierzchni, która byłaby reprezentatywna dla danego elementu. W proponowanej metodzie zdecydowano się na zachowanie kryterium jakim jest udział procentowy powierzchni porów oraz ograniczono dolną średnicę badanych porów do 1 mm. Ograniczenie to wynika z faktu, iż pory poniżej 1 mm nie są widoczne dla obserwatora oddalonego od powierzchni ściany powyżej 3 m. Ponadto, niewielkie pory rzędu dziesiątych części milimetra, mogą być pożądane ze względu na zastosowane dodatki napowietrzające.

Porowatość powierzchni może być niejednorodna - nawet przy niewielkiej średniej porowatości mogą wystąpić skupiska o podwyższonej lub obniżonej jej wartości, co wpływa na estetykę powierzchni. Z tego względu zdecydowano się na zweryfikowanie przydatności różnych parametrów statystycznych do opisu porowatości powierzchni:

- średnia powierzchnia porów,
- mediana,
- średnia kwadratowa,
- wariancja,
- odchylenie standardowe,
- współczynnik zmienności [%],
- średnia porowatość powyżej 80 percentyla,
- średnia porowatość powyżej 90 percentyla.

8.2.1.3. Opis programu badawczego oceny porowatości

Pierwszym celem badań była weryfikacja możliwości zastosowania zaproponowanej metody do precyzyjnego określenia procentowej zawartości porów o minimalnej średnicy 1 mm na powierzchni gładkiego betonu architektonicznego oraz sprawdzenie wpływu kolorystyki i chropowatości na wynik pomiaru. Kolejnym celem było wyłonienie miar oceny porowatości danego elementu wykonanego z betonu architektonicznego, które pozwalałyby opisać strukturę porowatości powierzchni.

W kolejnych etapach programu badawczego analizowano różne kombinacje algorytmów i parametrów w celu uzyskania optymalnych rezultatów.

Etap 1. obejmował porównanie efektywności poszczególnych algorytmów progowania lokalnego w kontekście oceny powierzchni otworów w płytkach drukowanych, a także wybór najlepszej ogniskowej aparatu.

W etapie 2. analizowano trzy najefektywniejsze algorytmy progowania lokalnego w połączeniu z różnymi wariantami operacji morfologicznych, oceniając ich wpływ na dokładność pomiaru.

Etap 3. polegał na sprawdzeniu najbardziej obiecujących wariantów algorytmów obliczeniowych pod kątem wpływu chropowatości i kolorystyki (przebarwień) na wynik pomiaru.

Na podstawie wniosków z etapu pierwszego, drugiego i trzeciego, wyłoniono najlepszy algorytm pomiaru porowatości.

W etapie 4. sprawdzono różne miary oceny porowatości powierzchni.

Opracowana metoda badawcza została następnie sprawdzona podczas badań walidacyjnych. Na ich podstawie wybrano ostateczne miary oceny porowatości powierzchni oraz wyznaczone zostały przedziały liczbowe dla danych kategorii powierzchni.

8.2.2. Badanie kolorystyki powierzchni

W oparciu o analizę istniejących metod oceny kolorystyki oraz obowiązujących wytycznych zdecydowano, że docelowa metoda badawcza powinna umożliwiać ilościowe określenie podobieństwa kolorystycznego pomiędzy analizowanymi powierzchniami. Szczególnie interesująca w tym kontekście wydaje się być przestrzeń barw CIELAB. Istnieją bowiem ugruntowane badania dotyczące percepcji różnic kolorystycznych w tej przestrzeni barw, a także zdefiniowano parametr ΔE , który określa ilościowo różnicę koloru i pozwala na określenie progu rozróżnialności barw przez ludzkie oko. Dodatkowo, w ramach programu

badawczego sprawdzono również przestrzeń barw sRGB, stanowiącą podstawową przestrzeń wykorzystywaną w systemach rejestracji obrazu w aparatach fotograficznych.

Istotnym zagadnieniem było również zminimalizowanie wpływu chropowatości i porowatości powierzchni na wynik pomiaru koloru oraz zapewnienie powtarzalnych warunków oświetleniowych. Aby tego dokonać zdecydowano się na wykorzystanie oświetlenia prostopadłego do badanej powierzchni, umieszczonego w pobliżu obiektywu aparatu (oświetlenie górne urządzenia DARK-BOX). Miało to na celu zminimalizowanie liczby cieni na wynikowych zdjęciach, które mogłyby zaburzyć wynik pomiaru.

Przed rozpoczęciem właściwego programu badawczego, przeprowadzono wstępne badania mające na celu sprawdzenie założeń dotyczących metody badawczej.

8.2.2.1. Weryfikacja wstępnych założeń badania kolorystyki

Celem wstępnego badania kolorystyki było sprawdzenie czy urządzenie DARK-BOX może być użyteczne do porównania kolorów różnych powierzchni wykonanych z betonu architektonicznego. Przedmiotem badania były dwie płyty z betonu architektonicznego o wymiarach około 30x30 cm, obie wykonane z użyciem białego cementu. Różnicą był rodzaj użytego kruszywa - w płycie nr 1 zastosowano piasek wiślany, a w płycie nr 2 biały piasek. Do porównania dodano także płytę z betonu niearchitektonicznego. Obliczono również kolor białej kartki papieru, która służyła jako element odniesienia, ponieważ celem twórców paneli użytych w badaniu było uzyskanie jak najbardziej białych powierzchni. Badanie polegało na wykonaniu zdjęć próbek w tych samych, jednorodnych warunkach oświetleniowych, przycięciu zdjęć do rozmiaru około 13,5x13,5 cm a następnie określeniu średniego koloru.

Następnie obliczano średni kolor każdej powierzchni w przestrzeni sRGB i za pomocą wzoru (8.1) określano odchylenie kolorystyczne badanej powierzchni od wzorca.

$$\Delta E = \sqrt{3 \cdot \Delta R^2 + 4 \cdot \Delta G^2 + 2 \cdot \Delta B^2} \quad (8.1)$$

$$\Delta R = R_W - R_P$$

$$\Delta G = \frac{(G_W - G_P) \cdot R_B}{G_B}$$

$$\Delta B = \frac{(B_W - B_P) \cdot R_B}{B_B}$$

gdzie:

R_W - Wartość R powierzchni wzorca

G_W - Wartość G powierzchni wzorca

B_W - Wartość B powierzchni wzorca

R_P - Wartość R badanej powierzchni

G_P - Wartość G badanej powierzchni

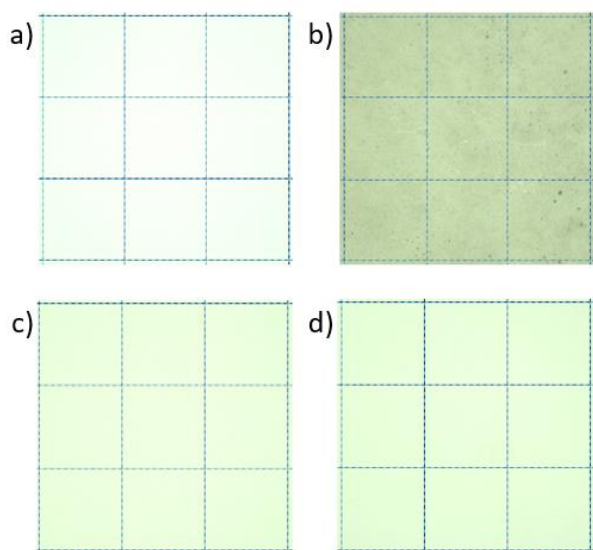
B_P - Wartość B badanej powierzchni

R_B - Wartość R achromatycznej powierzchni odniesienia

G_B - Wartość G achromatycznej powierzchni odniesienia

B_B - Wartość B achromatycznej powierzchni odniesienia

Wzór (8.1) został zaproponowany w taki sposób, aby zminimalizować wpływ błędnego dobrania balansu bieli i jest używany do obliczania względnej różnicy danej składowej koloru między powierzchnią odniesienia a badaną powierzchnią. Parametr ΔE jest to ważona odległość euklidesowa między badaną powierzchnią a powierzchnią odniesienia. Zastosowany wzór stanowi próbę dostosowania wzoru na odległość kolorystyczną w przestrzeni sRGB do sytuacji, w której nie zastosowano korekcji kolorystycznej zdjęć. Z tego powodu do wzoru należało dodać achromatyczną powierzchnię odniesienia. W badanym przypadku biała kartka papieru została użyta zarówno jako powierzchnia wzorcowa jak i achromatyczna powierzchnia odniesienia. Przycięte zdjęcia przedstawiono na Rys. 8.3.



Rys. 8.3 . Fotografie badanych powierzchni: a) biała kartka, b) beton niearchitektoniczny, c) Powierzchnia nr 1 - beton z piaskiem wiślanym, d) Powierzchnia nr 2 - beton z białym piaskiem

W Tab. 8.1 przedstawiono wyniki wykonanych obliczeń. Zielonkawe zabarwienie fotografii spowodowane było brakiem kalibracji kolorystycznej obrazu oraz parametrami balansu bieli, niemniej jednak zdjęcia dla każdej powierzchni zostały wykonane w tych samych warunkach oświetleniowych przy tych samych ustawieniach aparatu.

Tab. 8.1. Wyniki klasyfikacji badanych powierzchni

Nazwa parametru	Powierzchnia wzorcowa	Beton zwykły	Próbka nr 1	Próbka nr 2
średnia wartość R (0-255)	191,22	139,78	181	176,56
średnia wartość G (0-255)	215,33	158,67	206,11	201,33
średnia wartość B (0-255)	189,89	115,22	166,89	162,78
ΔE	0	171,39	40,68	52,48

Z uzyskanych wyników można wywnioskować, że próbka nr 1 bardziej odpowiada elementowi odniesienia niż próbka nr 2. Umożliwiło to dokonanie oceny podobieństwa na poziomie opisowym, to jest wskazania próbki najbardziej podobnej do wzorca. Pomimo, że udało się zmierzyć podobieństwo kolorystyczne w sposób ilościowy, kwestia akceptowalności poziomu różnicy kolorystycznej pozostała otwarta.

Na bazie przeprowadzonego badania wysnuto szereg wniosków. Po pierwsze, użycie wzorca jako punktu odniesienia do oceny średniego koloru może być dobrym kierunkiem, gdyż może

to kompensować ewentualne błędy w doborze balansu bieli oraz w sposobie odbioru barwy przez aparat. Niemniej, aby móc interpretować właściwie wyniki pomiaru należałoby dokonać kalibracji kolorystycznej fotografii, a dystans obliczać w przestrzeni CIELAB, dla której istnieją badania pozwalające na interpretację wyników wartości podobieństwa między kolorami.

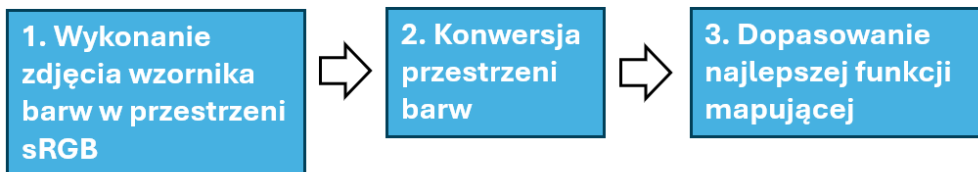
8.2.2.2. Algorytm korekcji kolorystyki zdjęcia

Badania wstępne wykazały potrzebę zastosowania algorytmu, który korygowałby kolorystykę uzyskanych zdjęć.

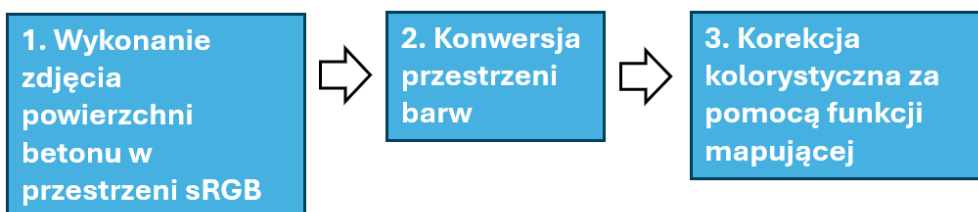
Ogólnym założeniem proponowanego algorytmu korekcji było stworzenie funkcji wielomianowych, które przekształcałyby zmierzone składowe barwy na wartości skorygowane, tak aby najlepiej dopasować się do znanych wartości koloru wzornika. W tym celu sfotografowano wzornik koloru *Datacolor Sydercheckr* o 24 polach kolorystycznych. Dla każdego pola znano faktyczną wartość składowych koloru (w przestrzeni sRGB oraz CIELAB). Następnie sprawdzono średnie wartości poszczególnych składowych sRGB dla wykonanych zdjęć i dopasowano funkcję wielomianową, dla której błąd dopasowania kolorów zmierzonych do ich znanych wartości będzie najmniejszy.

Następnie opracowano warianty opisanej metody obliczeniowej. Poszczególne warianty stanowią kombinację trzech zmiennych. Pierwszym jest przestrzeń kolorystyczna użyta na etapie dopasowania funkcji mapującej. Jak podano w opisie algorytmu obliczeniowego, odczyt kolorów ze zdjęcia następował w przestrzeni sRGB. W zależności od wariantu, podczas obliczania funkcji mapującej kolory teoretyczne i zmierzone były przeliczane na przestrzeń XYZ lub CIELAB lub pozostawały w przestrzeni sRGB. Kolejnym zmiennym czynnikiem mogącym wpłynąć na wynik był stopień użytej funkcji wielomianowej. Wstępne pomiary wykluczyły stopnie powyżej 3., dlatego we właściwym etapie badań sprawdzono warianty oparte na funkcjach 2. i 3. stopnia. Ostatnim zmiennym czynnikiem był numer odczytu wzornika barwy - w pierwszym wariantcie wzornik ustawiony był w poziomie, w drugim w pionie. Drobne różnice w odczycie kolorów poszczególnych pól wzornika wynikały z niewielkich różnic w oświetleniu poszczególnych fragmentów powierzchni. Na tej podstawie wyłoniono 12 wariantów opisanej metody obliczeniowej stanowiących wszystkie możliwe kombinacje wyżej wymienionych zmiennych.

1. etap: Dopasowanie funkcji mapującej



2. etap: Korekcja kolorystyczna wykonanych zdjęć powierzchni przy użyciu funkcji mapującej



Rys. 8.4. Poszczególne etapy kalibracji kolorystycznej zdjęcia

8.2.2.3. Sposób obliczania podobieństwa kolorystycznego

Zgodnie z rozważaniami zawartymi w rozdziale 5.4, dla przestrzeni sRGB użyto następującego wzoru obliczania podobieństwa kolorystycznego:

$$\Delta E_{(RGB)} = \sqrt{\left(2 + \frac{\bar{r}}{256}\right) \cdot \Delta R^2 + 4 \cdot \Delta G^2 + \left(2 + \frac{255 - \bar{r}}{256}\right) \cdot \Delta B^2} \quad (8.2)$$

$$\bar{r} = \frac{C_{1,R} + C_{2,R}}{2}$$

$$\Delta R = C_{1,R} - C_{2,R}$$

$$\Delta G = C_{1,G} - C_{2,G}$$

$$\Delta B = C_{1,B} - C_{2,B}$$

gdzie:

$C_{1,R}$ - Średnia wartość parametru R dla powierzchni nr 1

$C_{1,G}$ - Średnia wartość parametru G dla powierzchni nr 1

$C_{1,B}$ - Średnia wartość parametru B dla powierzchni nr 1

$C_{2,R}$ - Średnia wartość parametru R dla powierzchni nr 2

$C_{2,G}$ - Średnia wartość parametru G dla powierzchni nr 2

$C_{2,B}$ - Średnia wartość parametru B dla powierzchni nr 2

Dla przestrzeni CIELAB korzystano z następującego wzoru na podobieństwo kolorystyczne, odpowiadające dystansowi euklidesowemu między dwoma kolorami:

$$\Delta E_{(Lab)} = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2} \quad (8.3)$$

Nazewnictwo obu parametrów przyjęto tak, aby móc w łatwy sposób rozróżnić zastosowane przestrzenie barw.

8.2.2.4. Ocena kolorystyki powierzchni

Istotnym aspektem oceny kolorystyki powierzchni jest wybranie właściwych miar i kryteriów oceny powierzchni całych elementów wykonanych z betonu architektonicznego.

Analiza zapisów normowych oraz praktyki budowlanej wskazuje na dwa istotne aspekty związane z kolorystyką. Pierwszym jest dominujący kolor powierzchni. Różnice w dominującym kolorze powierzchni można odnieść do wzorca lub do dominującego koloru innych powierzchni. Istotne jest właściwe obliczenie dominującego koloru danej powierzchni, tak aby pomiar nie był zaburzony przez przebarwienia, które należy traktować jako wadę.

Kolejnym aspektem jest właściwa ocena wcześniej wspomnianych przebarwień powierzchni. Wymogi dotyczące przebarwień są szeroko omawiane w normach i instrukcjach, jednak większość wymagań stanowią kryteria jakościowe (Tab. 3.9). Niewielkie przebarwienia takie jak miejscowe zabrudzenia czy ciemniejsze smugi na łączeniach płyt szalunkowych są łatwe w identyfikacji przez obserwatora, jednak prawidłowa ocena przebarwień powierzchniowych może stanowić pewne wyzwanie. Biorąc pod uwagę powyższe wymagania i ograniczenia zaproponowano następujące metody oceny.

Do oceny dominującego koloru powierzchni zaproponowano metodę polegającą na wyznaczeniu koloru powierzchni na podstawie zdjęć wykonanych w równych odstępach 50 cm na całej badanej powierzchni. Następnie na podstawie wyników wyciąga się odpowiednią miarę kolorystyki.

Zaproponowano następujące parametry statystyczne do opisu dominującej kolorystyki powierzchni:

- średni kolor - miara najbardziej podstawowa, może być narażona na obserwacje odstające,
- mediana - mniej narażona na obserwacje odstające, może dobrze opisywać kolor powierzchni bez uwzględnienia przebarwień,
- średnia bez uwzględniania obserwacji odstających (odrzucone wyniki poniżej 10 i powyżej 90 percentyla).

Ponadto wyżej wymienione parametry statystyczne można oceniać w stosunku do wyników otrzymanych z pól pomiarowych 15x15 cm lub z pól 5x5 cm, będących wynikiem podziału pola 15x15 cm na 9 mniejszych części.

Do oceny przebarwień powierzchniowych zaproponowano metodę polegającą na wyznaczeniu w pierwszej kolejności dominującego koloru badanego elementu. Dodatkowo sprawdza się te fragmenty powierzchni, które potencjalnie mogą być zakwalifikowane jako niedopuszczalne przebarwienie. Ostatecznie porównuje się dominujący kolor powierzchni z kolorem wykonanych zdjęć za pomocą podobieństwa kolorystycznego ΔE . Zaproponowano następujące sposoby wyliczania koloru przebarwień:

- średni kolor pomiaru 15x15 cm,
- mediana koloru pomiaru 15x15 cm,
- kolor środkowego pola 5x5 cm dla pomiaru 15x15 cm,
- kolor pola 5x5 cm dla pomiaru 15x15 cm, dla którego różnica kolorystyczna w stosunku do dominującego koloru elementu jest największa.

8.2.2.5. Opis programu badawczego oceny kolorystyki

Badania modelowe służyły trzem celom:

- wyborowi wariantu kalibracji kolorystycznej,
- wyborowi miary oceny dominującego koloru badanego elementu,
- wyborowi miary oceny przebarwień powierzchni.

Z tego względu badania podzielono na kolejne etapy.

W etapie 1. sprawdzono dokładność oraz precyzję pomiaru koloru wzorników koloru NCS. Etap 2. polegał na przetestowaniu wariantów algorytmu pomiaru koloru pod kątem wpływu porowatości i chropowatości na wynik pomiaru. Na podstawie wniosków z etapu 1. i 2., wyłoniono najlepszy algorytm kalibracji kolorystycznej zdjęcia.

W 3. etapie badań modelowych wybrano najlepszą miarę oceny dominującego koloru powierzchni.

W 4. etapie badań modelowych wybrano najlepszą miarę oraz najlepsze oceny przebarwień powierzchniowych.

Opracowana w ten sposób metoda badawcza została następnie sprawdzona podczas badań walidacyjnych, po których wyznaczone zostały przedziały liczbowe dla danych kategorii powierzchni.

8.3. Testy urządzenia badawczego

Biorąc pod uwagę wymogi stawiane przed urządzeniem badawczym sformułowane w poprzednich punktach oraz aby umożliwić porównywanie poszczególnych powierzchni, szczególnie w kontekście kolorystyki, konieczne było zapewnienie nie tylko stałości warunków oświetleniowych, ale także jednolitości parametrów wykonywanych fotografii. W związku z tym parametry takie jak wartość przysłony, czas ekspozycji oraz czułość ISO powinny być stałe dla wszystkich wykonanych fotografii. Kluczowe było również zminimalizowanie szumu cyfrowego, który mógłby być spowodowany zbyt wysokim ustawieniem parametru ISO odpowiadającym za czułość matrycy na światło, oraz zapewnienie odpowiedniej jasności zdjęcia, aby uniknąć zarówno prześwietlenia, jak i niedoświetlenia badanego obiektu. Metodą doświadczalną ustalono następujące wartości parametrów zdjęć:

- jednostka przysłony - F/2.8,
- czas ekspozycji - 200 s,
- czułość matrycy na światło (ISO) - 200.

Parametry te minimalizują powstawanie szumów cyfrowych jednocześnie zachowując odpowiednią jasność obrazu. Dodatkowo, aby otrzymać możliwie najlepsze odwzorowanie kolorów, balans bieli został ustalony na podstawie wzornika fotograficznego ColorChecker Whitebalance.

Po ustaleniu parametrów zdjęć, przeprowadzono analizę dystorsji obrazu, która odnosi się do zniekształcenia geometrycznego, manifestującego się jako zmiana wielkości obiektów w zależności od ich położenia względem centrum kadru. W celu oceny tego zjawiska, wykonano zdjęcia wzorcowanego przymiaru kreskowego umieszczonego w dwóch orientacjach: pionowej i poziomej, tak aby podziałka przymiaru przechodziła przez środek zdjęcia. Następnie dokonano pomiaru liczby pikseli pomiędzy każdym pełnym centymetrem na skali przymiaru, co pozwoliło na określenie lokalnej skali obrazu w różnych miejscach kadru. Na podstawie

przeprowadzonych pomiarów stwierdzono, że dla centralnego obszaru zdjęcia o wymiarach 15x15 cm poziom dystorsji może być pomijalny. Obliczona średnia liczba pikseli przypadająca na milimetr wynosiła około 16,933 piksela. Ocena powtarzalności zdjęć została wykonana w ramach kolejnych etapów. Na Rys. 8.5 zaprezentowano przykładowe zdjęcie przymiaru wykorzystane w trakcie badań.



Rys. 8.5. Przymiar kreskowy wykorzystany podczas oceny dystorsji zdjęcia

8.4. Powierzchnie badawcze

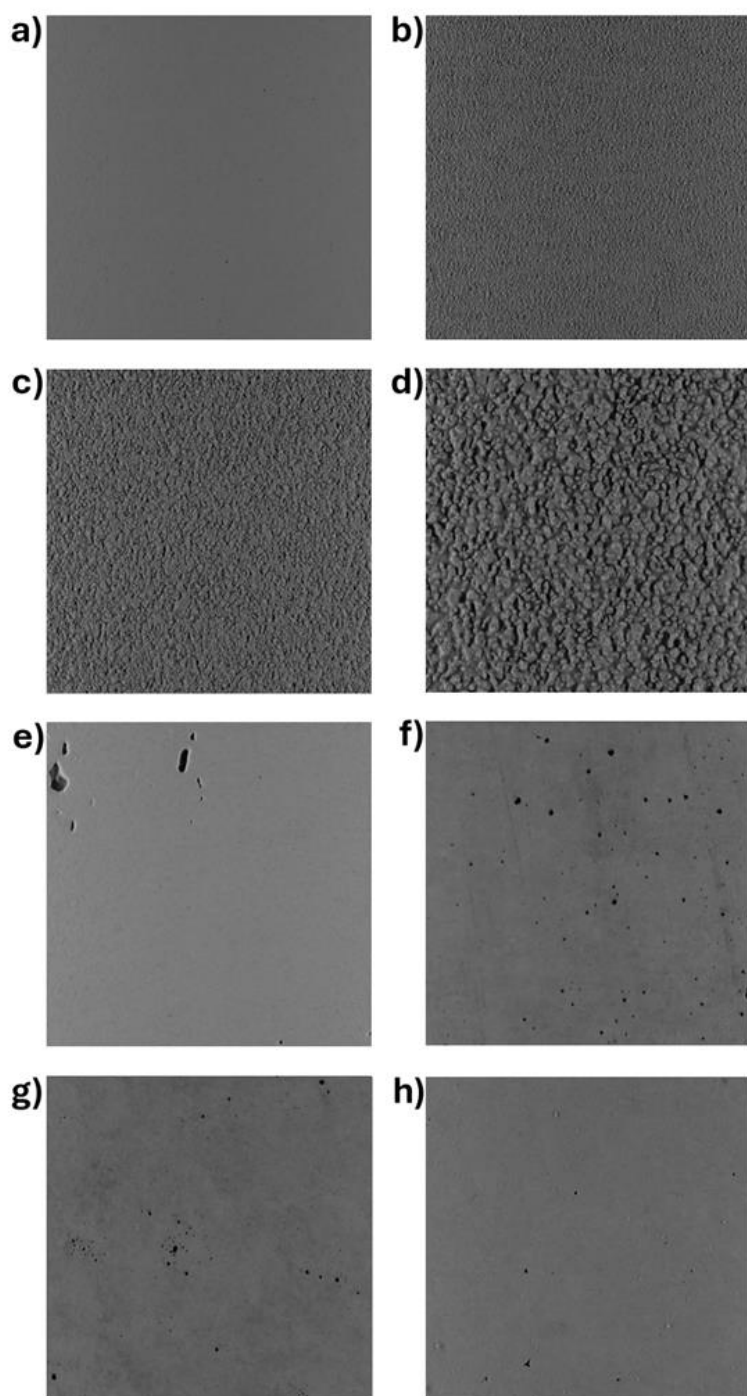
Aby zweryfikować przydatność proponowanej metody badawczej, wykonano szereg powierzchni modelowych dla których ustandaryzowano cechy powierzchni takie jak chropowatość, porowatość oraz kolor.

W celu zasymulowania zróżnicowanej chropowatości powierzchni betonu architektonicznego w badaniach modelowych wykorzystano papier ścierny o różnych gradacjach. Wybór tego materiału podyktowany był kilkoma istotnymi czynnikami. Po pierwsze, papier ścierny jest powszechnie dostępny i podlega standaryzacji produkcji (np. norma *ISO 6344* [97]), co gwarantuje powtarzalność parametrów chropowatości na całej powierzchni próbki dla danej gradacji i umożliwia odtworzenie eksperymentu w innych laboratoriach. Po drugie, zastosowanie papieru ściernego pozwala na kontrolę nad chropowatością powierzchni modelowych, co umożliwia zbadanie wpływu chropowatości na wyniki pomiarów porowatości i kolorystyki z wykorzystaniem projektowanej metody. Choć papier ścierny nie odzwierciedla w pełni struktury powierzchni betonu, pozwala na symulację zróżnicowanej chropowatości, która wpływa na tworzenie się obszarów zacienionych na obrazie, co jest kluczowe z punktu

widzenia projektowanej metody badawczej. Papier ścierny może dobrze oddawać nierówności betonu wpływające na zachowanie się światła na powierzchni betonu, co jest szczególnie istotne w kontekście proponowanej metody.

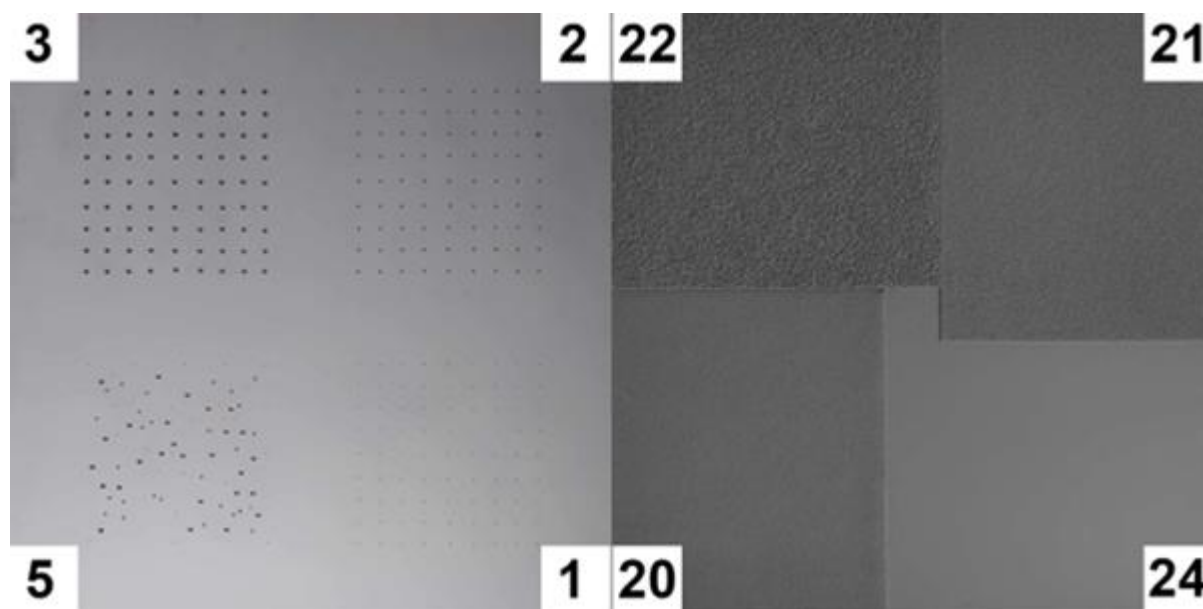
Do wykonania powierzchni modelowych użyto płyt pleksi grubości 2 mm i wymiarach 50x50 cm. Na każdej z płyt wyznaczono 4 obszary pomiarowe o wymiarach 15x15 cm. Każdy z obszarów pomiarowych potraktowano jako osobną powierzchnie badawczą. Aby uzyskać pożądaną wygląd powierzchni badawczych, nałożono na nie papier ścierny o gramaturze P40, P80 lub P120 symulujący powierzchnie o różnej chropowatości, bądź pozostawiono powierzchnię gładką.

Papiery ściernie zostały dobrane w taki sposób, aby ich chropowatość była w zauważalnym stopniu wyższa od chropowatości gładkiej powierzchni betonu architektonicznego. Miało to pomóc w znalezieniu granicznej chropowatości, dla której pomiar porowatości nie będzie możliwy ze względu na cienie powstałe w wyniku rozwiniętej struktury geometrycznej powierzchni (Rys. 8.6).



Rys. 8.6. Obrazy powierzchni o wymiarach 5x5 cm przy jednakowym oświetleniu światłem bocznym: a) powierzchnia modelowa pokryta farbą, b) powierzchnia modelowa pokryta papierem P120, c) powierzchnia modelowa pokryta papierem P80, d) powierzchnia modelowa pokryta papierem P40, e) powierzchnia płyty elewacyjnej z betonu architektonicznego, f) - h) powierzchnie betonowe sfotografowane na terenie budynku użyteczności publicznej (zdjęcia autora)

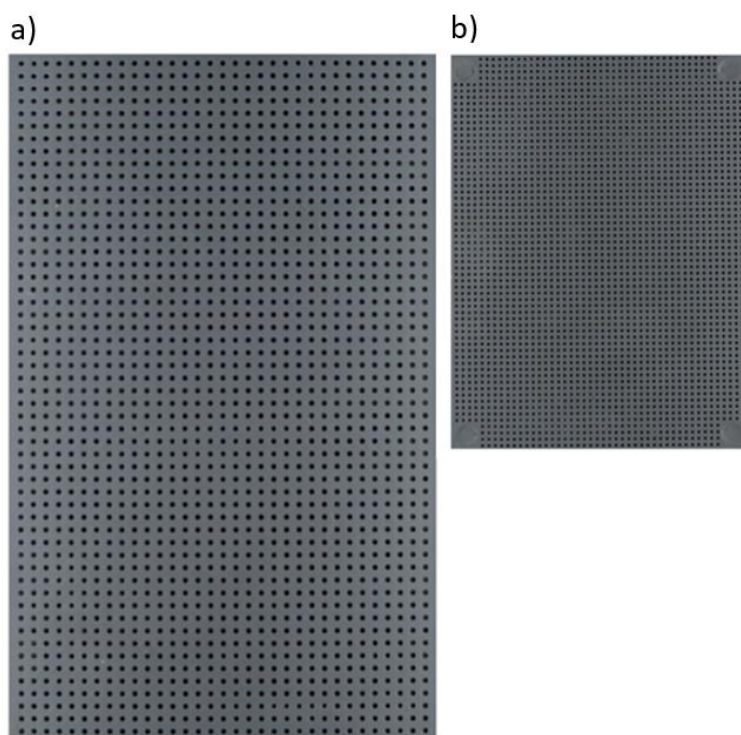
Następnie w obrębie powierzchni badawczych zostały wywiercone otwory o średnicy 1, 2 i 4 mm w różnych kombinacjach, w celu zasymulowania porowatości powierzchniowej betonu. W końcowej fazie powierzchnie zostały pomalowane na jeden z dwóch kolorów - jasno lub ciemnoszary, co miało pomóc w ocenie wpływu koloru powierzchni na wyniki pomiaru porowatości. Na Rys. 8.7 przedstawiono przykładowe płyty modelowe użyte w trakcie badań.



Rys. 8.7. Przykładowe płyty użyte w badaniach - po lewej płyta jasnoszara zawierająca powierzchnie nr 1, 2, 3 i 5; po prawej płyta ciemnoszara zawierająca powierzchnie nr 20, 21, 22 i 24

W badaniach użyto również fotograficznych wzorników kolorów: NCS S 0500-N - kolor biały, NCS S 2500-N - kolor jasny szary oraz NCS S 5000-N - kolor ciemny szary. Jako powierzchnia modelowa został także użyty fotograficzny wzornik ColorChecker White Balance. Do zadań związanych z kalibracją kolorystyczną użyto wzornik kalibracyjny kolorów Datacolor SpyderCheckr (Rys. 8.9). W badaniach wykorzystano również szereg płyt betonowych o zróżnicowanej kolorystyce, chropowatości i porowatości (Tab. 8.2).

Ponadto, na potrzeby badań porowatości użyto dwóch powierzchni wykonanych na bazie płytek drukowanych stosowanych w przemyśle elektronicznym. Płytką nr 1 (por. Rys. 8.8 a) o wymiarach 9x15 cm posiadała 1782 otworów o średnicy 1,05 (+/- 0,05) mm, druga płytką o wymiarach 6x8 cm posiadała 2788 otworów o średnicy 0,65 (+/- 0,05) mm. Na Rys. 8.8 przedstawiono zdjęcia opisywanych płytek.



Rys. 8.8. Płytki drukowane użyte we wstępnych badaniach porowatości: a) płytka z otworami o średnicy ok 1,05 mm; b) Płytką z otworami o średnicy ok 0,65 mm

Każdą powierzchnię modelową przyporządkowano do jednej z sześciu klas chropowatości, gdzie klasa 0 oznacza powierzchnie o fakturze najbardziej gładkiej, a klasa 4 powierzchnie najbardziej chropowate. Ponadto klasa 5 oznacza powierzchnię betonową bez wskazania jej chropowatości.

W Tab. 8.2 oraz 8.3 zestawiono powierzchnie badawcze użyte podczas badań.



Rys. 8.9. Wzornik koloru Datacolor Spydercheckr użyty do kalibracji kolorystycznej

Tab. 8.2. Zestawienie przygotowanych powierzchni badawczych - część 1.

Nr	Klasa chropowatości	Kolor	Otworki	Powierzchnia
1	1	jasnoszary	1 mm	gładka
2	1	jasnoszary	2 mm	gładka
3	1	jasnoszary	4 mm	gładka
4	1	jasnoszary	mix 1	gładka
5	1	jasnoszary	mix 2	gładka
6	1	ciemnoszary	1 mm	gładka
7	1	ciemnoszary	2 mm	gładka
8	1	ciemnoszary	4 mm	gładka
9	1	ciemnoszary	mix 1	gładka
10	1	ciemnoszary	mix 2	gładka
11	2	jasnoszary	mix 1	papier P120
12	3	jasnoszary	mix 1	papier P80
13	4	jasnoszary	mix 1	papier P40
14	2	ciemnoszary	mix 1	papier P120
15	3	ciemnoszary	mix 1	papier P80
16	4	ciemnoszary	mix 1	papier P40
17	2	jasnoszary	brak	papier P120
18	3	jasnoszary	brak	papier P80
19	4	jasnoszary	brak	papier P40
20	2	ciemnoszary	brak	papier P120
21	3	ciemnoszary	brak	papier P80
22	4	ciemnoszary	brak	papier P40
23	1	jasnoszary	brak	gładka
24	1	ciemnoszary	brak	gładka
R1	1	jasnoszary	1,05 mm	gładka
R2	1	jasnoszary	0,65 mm	gładka

Legenda klasa chropowatości:

- 0 - powierzchnia płaska (papier)
- 1 - powierzchnia płaska z drobną fakturą farby
- 2 - powierzchnia lekko chropowata (papier ścierny gradacji P120)
- 3 - powierzchnia średnio chropowata (papier ścierny gradacji P80)
- 4 - powierzchnia mocno chropowata (papier ścierny gradacji P40)
- 5 - powierzchnia betonowa o różnym stopniu chropowatości

Legenda otworki:

- 1 mm - 81 otworów o średnicy 1 mm w regularnych odstępach między środkami co ok. 1,75 mm
- 2 mm - 81 otworów o średnicy 2 mm w regularnych odstępach między środkami co ok. 1,75 mm
- 4 mm - 81 otworów o średnicy 4 mm w regularnych odstępach między środkami co ok. 1,75 mm
- mix1 - po 27 otworów o średnicy 1, 2 i 4 mm w regularnych odstępach co ok. 1,75 mm
- mix2 - po 27 otworów o średnicy 1, 2 i 4 mm w nieregularnych odstępach
- 1,05 mm - 1782 otworki o średnicy 1,05 mm w regularnych odstępach między środkami
- 0,65 mm - 2788 otworków o średnicy 0,65 mm w regularnych odstępach między środkami

Tab. 8.3. Zestawienie przygotowanych powierzchni badawczych - część 2.

Nr	Klasa chropowatości	Nazwa
25	0	wzornik koloru NCS S 0500-N biały
26	0	wzornik koloru NCS S 2500-N jasny szary
27	0	wzornik koloru NCS S 5000-N ciemny szary
28	0	wzornik kalibracyjny kolorów <i>Datacolor Sydercheckr</i>
29	0	wzornik balansu bieli <i>ColorChecker White Balance</i>
30	5	płyta beton architektoniczny, biała 40x80 cm
31	5	płyta beton architektoniczny, szara 40x80 cm
32	5	płyta beton architektoniczny, szara 40x40 cm
33	5	płyta beton, biały cement 25x60 cm
34	5	płyta beton, jasnoszara 30x30 cm
35	5	płyta beton, szara 30x30 cm - nr 1
36	5	płyta beton, szara chropowata 30x60 cm
37	5	płyta beton, szara 30x30 cm - nr 2
Legenda klasa chropowatości: 0 - powierzchnia płaska (papier) 1 - powierzchnia płaska z drobną fakturą farby 2 - powierzchnia lekko chropowata (papier ścierny gradacji P120) 3 - powierzchnia średnio chropowata (papier ścierny gradacji P80) 4 - powierzchnia mocno chropowata (papier ścierny gradacji P40) 5 - powierzchnia betonowa o różnym stopniu chropowatości		

Dodatkowo, przy ocenie dokładności metody określania powierzchni porów, do powierzchni nieposiadających porów (nr 17÷24, 29) zostały dodane pory wygenerowane komputerowo. Zestawienie liczby i wielkości porów dodanych do poszczególnych powierzchni znajduje się w Tab. 8.4.

Tab. 8.4. Liczba porów dodana w poszczególnych wariantach

Średnica porów [mm]	Przybliżony udział powierzchni [%]		
	1,2	0,8	0,4
0,59	330	220	110
1	115	78	39
2	30	20	10
4	8	5	3

9. Badania modelowe

9.1. Badania porowatości

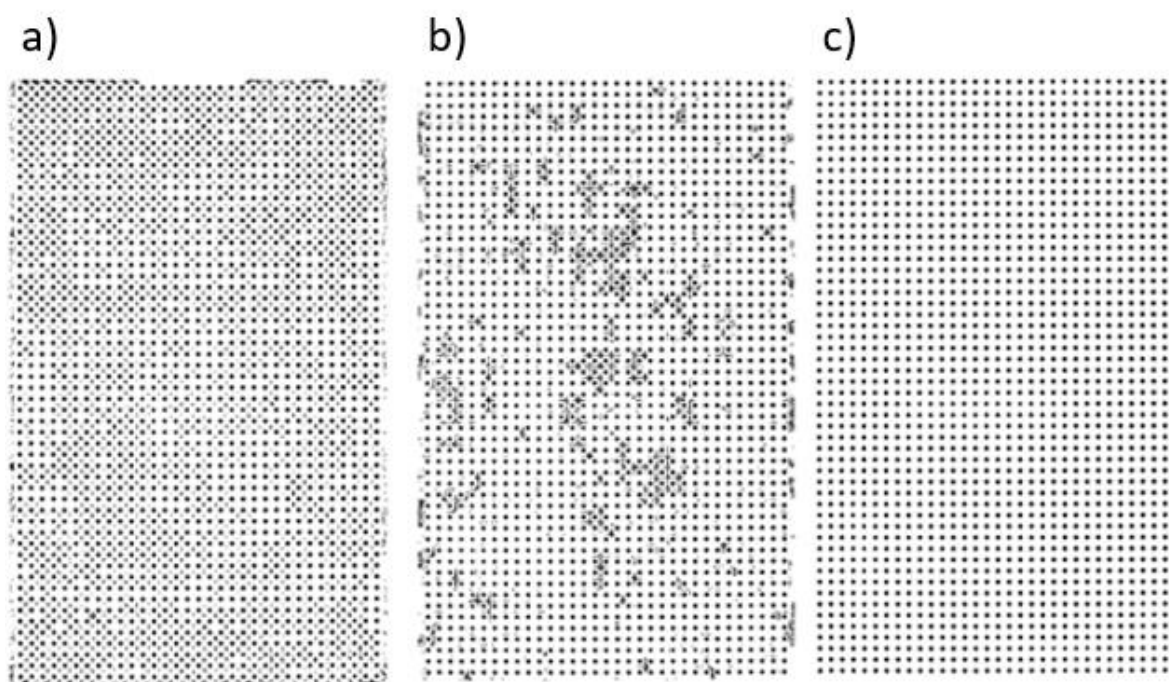
9.1.1. Wybór ogniskowej i algorytmu progowania lokalnego

Celem 1. etapu badań, zgodnie z numeracją etapów przyjętą w rozdziale 8.2.1.3, był wybór ogniskowej aparatu fotograficznego do rejestracji obrazu powierzchni, które będą wykorzystywane w kolejnych etapach badań. W ramach tego etapu analizowano przydatność następujących algorytmów progowania lokalnego: Niblack, Sauvola, Local Otsu, Bernsen, Feng, Singh, Contrast oraz Bradley Roth, które zastosowano do obrazów zarejestrowanych przy zastosowaniu ogniskowych obiektywu aparatu: 24 mm i 50 mm.

Zmiana ogniskowej powoduje przybliżenie lub oddalenie obrazu widzianego na zdjęciu, co ma wpływ na liczbę pikseli przypadającą na jednostkę powierzchni. Przy zastosowaniu urządzenia DARK-BOX z ogniskową 24 mm, na 1 centymetr kwadratowy przypada około 7586 pikseli, podczas gdy z zastosowaniem ogniskowej 50 mm na 1 centymetr kwadratowy przypada około 29036 pikseli. Z tego powodu zdjęcia wykonane przy ogniskowej 50 mm powinny lepiej oddawać szczegóły, z kolei analiza zdjęć dla ogniskowej 24 mm powinna wymagać mniejszej mocy obliczeniowej komputera.

Badanie polegało na wykonaniu 7 zdjęć płytkom wzorcowym R1 i R2 z zastosowaniem dwóch różnych ogniskowych aparatu – 50 i 24 mm. Następnie zdjęcia zostały przycięte, tak aby była widoczna tylko powierzchnia płytek. Obrazy powierzchni zostały przekonwertowane do skali szarości, po czym zastosowano operację binaryzacji stosując progowanie lokalne przy wykorzystaniu 8 algorytmów. Następnie, dla każdego zdjęcia zliczono liczbę czarnych pikseli i porównano ją z wartością teoretyczną obliczając dokładność pomiaru, której miarą była wartość błędu względnego. Sprawdzono również, czy w wyniku binaryzacji zostały zaczernione wszystkie otwory oraz czy nie zostały zaczernione także inne elementy zdjęcia niebędące otworami.

Na Rys. 9.1 przedstawiono przykładowe wyniki binaryzacji przebadanych powierzchni. Można zauważyć, że w wyniku działania niektórych algorytmów również powierzchnia płytki została w pewnych miejscach zaczerniona. W Tab. 9.1 przedstawiono wyniki uzyskane dla obrazów zarejestrowanych aparatem DARK-BOX z ogniskową 50 mm i 24 mm.



Rys. 9.1. Przykłady binaryzacji różnymi algorytmami płytki drukowanej R1, zdjęcie wykonane przy ogniskowej 50 mm, a) Algorytm Local Otsu, b) Algorytm Contrast, c) Algorytm Sauvola

Tab. 9.1. Wyniki badań porowatości powierzchni R1 i R2 w zależności od ogniskowej aparatu

Algorytm	Max błąd względny [%]	Zaczerniona tylko powierzchnia otworów (R1/R2)	Zaczernione wszystkie otwory (R1/R2)	Max błąd względny [%]	Zaczerniona tylko powierzchnia otworów (R1/R2)	Zaczernione wszystkie otwory (R1/R2)
	ogniskowa 50 mm			ogniskowa 24 mm		
Niblack	23,90	N/N	T/T	31,75	N/N	T/N
Sauvola	6,82	T/T	T/T	17,77	T/T	T/N
Local Otsu	20,58	N/N	T/T	33,78	N/N	T/N
Bernsen	27,31	N/T	T/N	46,83	N/N	T/N
Feng	10,38	T/T	T/T	20,52	T/T	T/N
Singh	99,57	N/N	N/N	100,00	N/N	N/N
Contrast	24,02	N/N	T/T	43,67	N/N	T/N
Bradley Roth	18,19	T/T	T/T	8,61	T/T	T/N

Zarówno dla ogniskowej aparatu 24 i 50 mm, najmniejszy maksymalny błąd względny uzyskano przy zastosowaniu algorytmów Sauvola, Feng oraz Bradley Roth. W przypadku

zastosowania wymienionych algorytmów i ogniskowej 50 mm zaczerzeniu nie uległy elementy tła niebędące otworami, a zaczernione zostały wszystkie otwory.

Ponieważ stosując ogniskową aparatu 50 mm uzyskano lepszą rozróżnialność otworów i tła, w szczególności dla powierzchni R2, w dalszych badaniach postanowiono stosować ogniskową aparatu 50 mm.

9.1.2. Dokładność i precyzja pomiaru porowatości

Biorąc pod uwagę wyniki uzyskane w 1. etapie, w 2. etapie badań wykorzystane zostały algorytmy Sauvola, Feng oraz Bradley Roth. Pierwszym krokiem było sprawdzenie precyzji pomiaru dla wariantów algorytmu obliczeniowego wymienionych w Tab. 9.2. W tym celu wykonano po 7 zdjęć powierzchni modelowych z nawierconymi porami o różnej średnicy (powierzchnie 4, 9, 11, 14). Następnie dla każdego wykonanego zdjęcia obliczono procentowy udział powierzchni porów wykorzystując każdy z 24 wariantów obliczeniowych. Łączna liczba uzyskanych w ten sposób wyników wynosiła 2688. Następnie uzyskane wyniki poddano analizie statystycznej obliczając współczynnik zmienności oraz minimalną liczbę prób konieczną do osiągnięcia założonej dokładności (Tab. 9.3). W nazwie wariantów obliczeniowych wskazano rodzaj elementu strukturalnego oraz liczbę przeprowadzonych operacji erozji i dylatacji (por. Tab. 9.2).

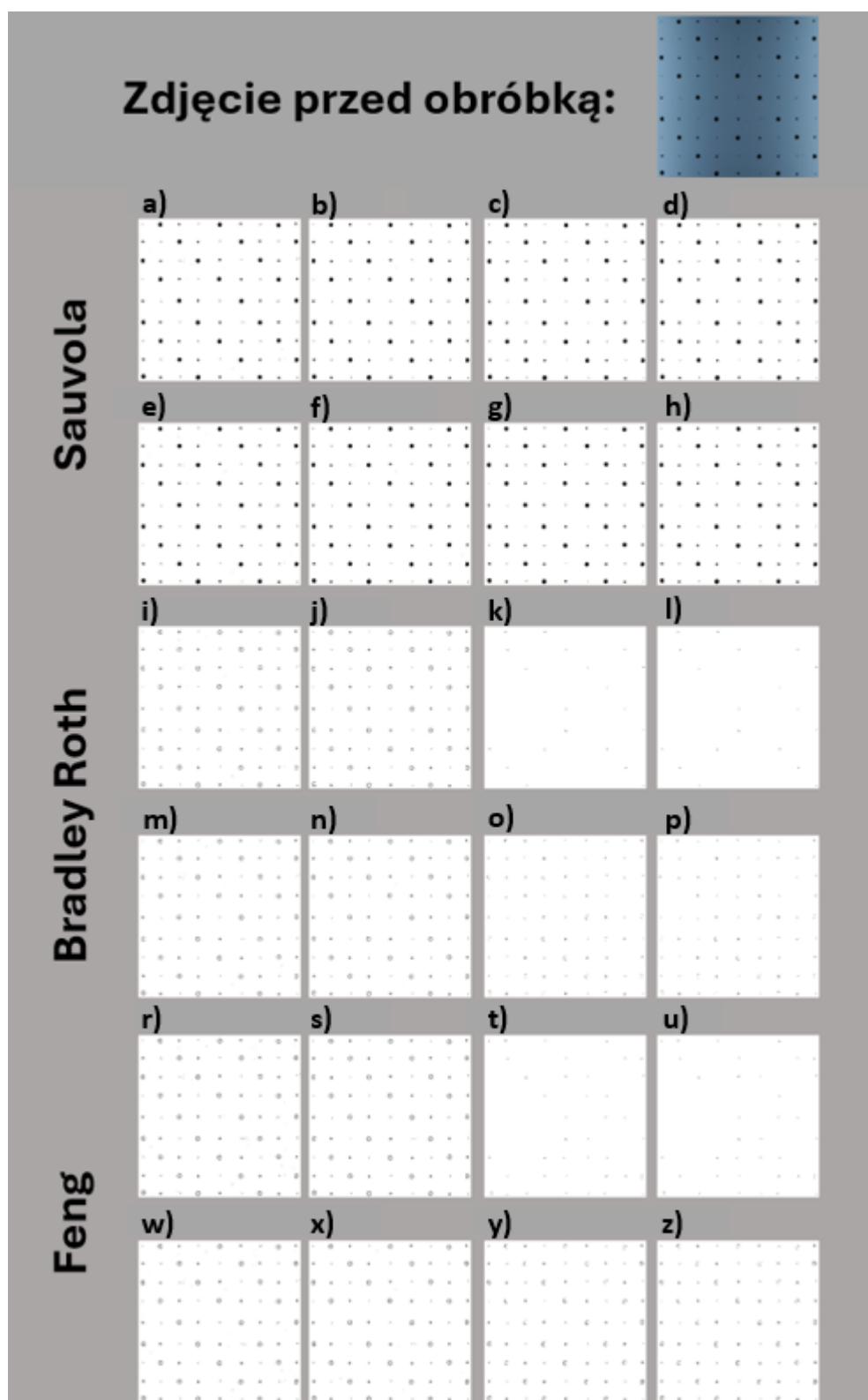
Tab. 9.2. Zestawienie parametrów użytych wariantów algorytmu obliczania powierzchni porów

Nr wariantu obliczeniowego	Nazwa wariantu	Algorytm binaryzacji	Element strukturalny	Ilość operacji erozji	Graniczna wielkość obiektów usuwanych po erozji [px]	Ilość operacji dylatacji
W1	sauvola_2x2_0_0_0	Sauvola	kwadrat 2x2 px	0	0	0
W2	sauvola_2x2_4_4_4	Sauvola	kwadrat 2x2 px	4	4	4
W3	sauvola_2x2_8_8_8	Sauvola	kwadrat 2x2 px	8	8	8
W4	sauvola_2x2_8_10_8	Sauvola	kwadrat 2x2 px	8	10	8
W5	sauvola_circle_0_0_0	Sauvola	okrąg $\varnothing$ 0 (brak)	1	0	1

W6	sauvola_circle_4_4_4	Sauvola	okrąg $\varnothing$ 4	1	4	1
W7	sauvola_circle_8_8_8	Sauvola	okrąg $\varnothing$ 8	1	8	1
W8	sauvola_circle_8_10_8	Sauvola	okrąg $\varnothing$ 8	1	10	1
W9	b_roth_2x2_0_0_0	Bradley Roth	kwadrat 2x2 px	0	0	0
W10	b_roth_2x2_4_4_4	Bradley Roth	kwadrat 2x2 px	4	4	4
W11	b_roth_2x2_8_8_8	Bradley Roth	kwadrat 2x2 px	8	8	8
W12	b_roth_2x2_8_10_8	Bradley Roth	kwadrat 2x2 px	8	10	8
W13	b_roth_circle_0_0_0	Bradley Roth	okrąg $\varnothing$ 0 (brak)	1	0	1
W14	b_roth_circle_4_4_4	Bradley Roth	okrąg $\varnothing$ 4	1	4	1
W15	b_roth_circle_8_8_8	Bradley Roth	okrąg $\varnothing$ 8	1	8	1
W16	b_roth_circle_8_10_8	Bradley Roth	okrąg $\varnothing$ 8	1	10	1
W17	feng_2x2_0_0_0	Feng	kwadrat 2x2 px	0	0	0
W18	feng_2x2_4_4_4	Feng	kwadrat 2x2 px	4	4	4
W19	feng_2x2_8_8_8	Feng	kwadrat 2x2 px	8	8	8
W20	feng_2x2_8_10_8	Feng	kwadrat 2x2 px	8	10	8
W21	feng_circle_0_0_0	Feng	okrąg $\varnothing$ 0 (brak)	1	0	1
W22	feng_circle_4_4_4	Feng	okrąg $\varnothing$ 4	1	4	1
W23	feng_circle_8_8_8	Feng	okrąg $\varnothing$ 8	1	8	1
W24	feng_circle_8_10_8	Feng	okrąg $\varnothing$ 8	1	10	1

Tab. 9.3. Precyzja pomiaru udziału procentowego porów wyrażona współczynnikiem zmienności oraz minimalna liczba prób potrzebna do uzyskania założonej dokładności pomiaru przy zastosowaniu różnych wariantów obliczeniowych

Nr wariantu obliczeniowego	Nazwa wariantu	Maksymalny współczynnik zmienności [%]	Minimalna liczba prób (dokł. 0,05)	Minimalna liczba prób (dokł. 0,1)
W1	sauvola_2x2_0_0_0	0,96	90	23
W2	sauvola_2x2_4_4_4	0,65	1	1
W3	sauvola_2x2_8_8_8	0,13	1	1
W4	sauvola_2x2_8_10_8	0,10	1	1
W5	sauvola_circle_0_0_0	0,96	90	23
W6	sauvola_circle_4_4_4	0,78	5	2
W7	sauvola_circle_8_8_8	0,08	1	1
W8	sauvola_circle_8_10_8	0,08	1	1
W9	b_roth_2x2_0_0_0	0,83	82	21
W10	b_roth_2x2_4_4_4	0,97	1	1
W11	b_roth_2x2_8_8_8	7,17	1	1
W12	b_roth_2x2_8_10_8	5,79	1	1
W13	b_roth_circle_0_0_0	0,63	82	21
W14	b_roth_circle_4_4_4	0,92	12	3
W15	b_roth_circle_8_8_8	1,50	1	1
W16	b_roth_circle_8_10_8	1,71	1	1
W17	feng_2x2_0_0_0	0,63	111	28
W18	feng_2x2_4_4_4	1,60	12	3
W19	feng_2x2_8_8_8	5,28	1	1
W20	feng_2x2_8_10_8	5,23	1	1
W21	feng_circle_0_0_0	0,63	111	28
W22	feng_circle_4_4_4	0,92	55	14
W23	feng_circle_8_8_8	1,50	1	1
W24	feng_circle_8_10_8	1,71	1	1



Rys. 9.2. Obrazy powierzchni modelowej nr 4 po przekształceniu różnymi wariantami algorytmu binaryzacji. Warianty oparte na algorytmie Sauvola (a ÷ h), warianty oparte na algorytmie Bradley Roth (i ÷ p), Warianty oparte na algorytmie Feng (r ÷ z)

Analizując wyniki podane w Tab. 9.3 można zauważyć, że najmniejszy współczynnik zmienności otrzymano dla wariantów W3, W4, W7 oraz W8, które odpowiadają różnym wariantom algorytmu Sauvola.

Kolejnym krokiem była analiza obrazów otrzymanych po obróbce 7 zdjęć jasnoszarej, gładkiej powierzchni z nawierconymi otworami o średnicy 1, 2 i 4 mm (powierzchnia modelowa nr 4) za pomocą 24 analizowanych wariantów algorytmu obliczeniowego, zgodnie z kolejnymi krokami przedstawionymi na Rys. 8.2. Uzyskane obrazy przedstawiono na Rys. 9.2.

Analizując otrzymane obrazy, można zauważyć, że jedynie zastosowanie wariantów obliczeniowych opartych na algorytmie Sauvola umożliwiły prawidłową detekcję wszystkich otworów. W przypadku większych otworów (2 i 4 mm) algorytmy Bradley Roth oraz Feng umożliwiły jedynie detekcję ich krawędzi, co jest niewystarczające z punktu widzenia proponowanej metody.

Kolejnym krokiem była analiza dokładności pomiaru. Jej celem było wskazanie wariantu obliczeniowego który jest najmniej czuły na zmiany cech powierzchni betonu.

W badaniu zastosowano 8 wariantów algorytmu obliczeniowego opartych na algorytmie Sauvola do analizy obrazów 5 powierzchni modelowych (17, 20, 23, 24 i 29). Powierzchnie różniły się kolorem oraz chropowatością, opis poszczególnych powierzchni znajduje się w Tab. 9.4.

Tab. 9.4. Zestawienie powierzchni modelowych użytych do oceny dokładności pomiaru porowatości

Nr	Kolor	Otwory	Powierzchnia
17	jasnoszary	brak	papier P120
20	ciemnoszary	brak	papier P120
23	jasnoszary	brak	gładka
24	ciemnoszary	brak	gładka
29	biały	brak	gładka

Do wspomnianych wyżej powierzchni dodano komputerowo pory zajmujące w przybliżeniu 1,2% powierzchni próbki, w 4 wariantach wielkości otworów (por. Tab. 8.4). Następnie obliczono dokładność pomiaru na dwa sposoby.

W pierwszym sposobie obliczono błąd względny na podstawie wyniku pomiaru porowatości osobno dla każdego wykonanego zdjęcia z nałożonymi porami, porównując wynik z wartościami teoretycznymi (liczbą dodanych czarnych pikseli reprezentujących pory). Następnie dla każdej kombinacji algorytmu i dodanej średnicy otworów obliczono maksymalny błąd względny wyników otrzymanych dla wszystkich 5 powierzchni (Tab. 9.5). Im mniejszy maksymalny błąd względny tym większa była dokładność pomiaru. Ze względu na ilość danych nie podano surowych wyników, których łączna liczba wynosiła 1120, podając jedynie maksymalny błąd względny jako miarę czułości algorytmu na zmiany powierzchni modelowej. Dane zawarte w pliku Excel mogą służyć pogłębionej analizie statystycznej. W nazwie wariantów obliczeniowych wskazano rodzaj elementu strukturalnego oraz ilość przeprowadzonych operacji erozji i dylatacji (por. Tab. 9.2).

Drugi sposób polegał na obliczaniu średniego udziału porowatości na podstawie pomiarów wszystkich zdjęć danej powierzchni z nałożonymi porami. Następnie obliczono błąd względny porównując wynik z wartościami teoretycznymi (liczbą dodanych czarnych pikseli reprezentujących pory). Następnie dla każdej kombinacji algorytmu i dodanej średnicy otworów obliczono maksymalny błąd względny wyników otrzymanych dla wszystkich 5 powierzchni (Tab. 9.6).

Tab. 9.5. Wyniki analizy dokładności pomiaru udziału procentowego porów przy zastosowaniu algorytmu Sauvola i różnych operacji morfologicznych - wariant z obliczaniem błędu względnego osobno dla każdego wykonanego zdjęcia

Nr wariantu obl.	Nazwa wariantu	Średnica otworów	Maksymalny błąd względny dla wszystkich powierzchni [%]
W1	sauvola_2x2_0_0_0	0,59 mm	8057,20
		1 mm	9524,83
		2 mm	7975,01
		4 mm	7449,29
W2	sauvola_2x2_4_4_4	0,59 mm	83,72
		1 mm	97,72
		2 mm	81,31
		4 mm	74,80

W3	sauvola_2x2_8_8_8	0,59 mm	100,00
		1 mm	16,24
		2 mm	1,92
		4 mm	1,14
W4	sauvola_2x2_8_10_8	0,59 mm	100,00
		1 mm	16,24
		2 mm	1,60
		4 mm	0,84
W5	sauvola_circle_0_0_0	0,59 mm	8057,20
		1 mm	9524,83
		2 mm	7975,01
		4 mm	7449,29
W6	sauvola_circle_4_4_4	0,59 mm	824,46
		1 mm	974,76
		2 mm	814,79
		4 mm	764,69
W7	sauvola_circle_8_8_8	0,59 mm	100,00
		1 mm	3,55
		2 mm	2,05
		4 mm	0,73
W8	sauvola_circle_8_10_8	0,59 mm	100,00
		1 mm	3,55
		2 mm	2,05
		4 mm	0,73

Tab. 9.6 Wyniki analizy dokładności pomiaru udziału procentowego porów przy zastosowaniu algorytmu Sauvola i różnych operacji morfologicznych - wariant z obliczaniem błędu względnego biorąc pod uwagę średni wynik pomiaru dla każdej powierzchni

Nr wariantu obl.	Nazwa wariantu	Średnica otworów	Maksymalny błąd względny dla wszystkich powierzchni [%]
W1	sauvola_2x2_0_0_0	0,59 mm	7784,26
		1 mm	9202,04
		2 mm	7705,33
		4 mm	7196,97
W2	sauvola_2x2_4_4_4	0,59 mm	67,60
		1 mm	79,88
		2 mm	65,82
		4 mm	60,95

W3	sauvola_2x2_8_8_8	0,59 mm	100,00
		1 mm	16,24
		2 mm	1,41
		4 mm	0,57
W4	sauvola_2x2_8_10_8	0,59 mm	100,00
		1 mm	16,24
		2 mm	1,33
		4 mm	0,50
W5	sauvola_circle_0_0_0	0,59 mm	7784,26
		1 mm	9202,04
		2 mm	7705,33
		4 mm	7196,97
W6	sauvola_circle_4_4_4	0,59 mm	738,48
		1 mm	871,79
		2 mm	730,64
		4 mm	685,98
W7	sauvola_circle_8_8_8	0,59 mm	100,00
		1 mm	3,55
		2 mm	1,66
		4 mm	0,55
W8	sauvola_circle_8_10_8	0,59 mm	100,00
		1 mm	3,55
		2 mm	1,66
		4 mm	0,55

W przypadku pierwszego sposobu obliczeń przy obliczaniu porowatości osobno dla każdego zdjęcia, można poczynić następujące obserwacje. Dla najmniejszych porów o średnicy 0,59 mm, wyniki uzyskane z wykorzystaniem testowanych wariantów nie były zadowalające, co sugeruje niską czułość algorytmu na obiekty o niewielkich rozmiarach. W przypadku porów o średnicy 1 mm, warianty W7 i W8 osiągnęły najniższy maksymalny błąd względny, nieprzekraczający 4%.

Dla porów o średnicy 2 mm i 4 mm, można zauważyć poprawę dokładności pomiaru przy wykorzystaniu wariantów charakteryzujących się wyższymi wartościami parametrów podanych w Tab. 9.2 (np. graniczna wielkość obiektów usuwanych po erozji: warianty W3, W4, W7 i W8), dla których maksymalny błąd względny nie przekroczył 2,05%. Warianty te wykorzystują zarówno kwadratowy jak i kolisty element strukturalny przy operacjach morfologicznych. Sugeruje to, że kluczowym czynnikiem determinującym dokładność pomiaru dla większych obiektów jest odpowiedni dobór parametrów.

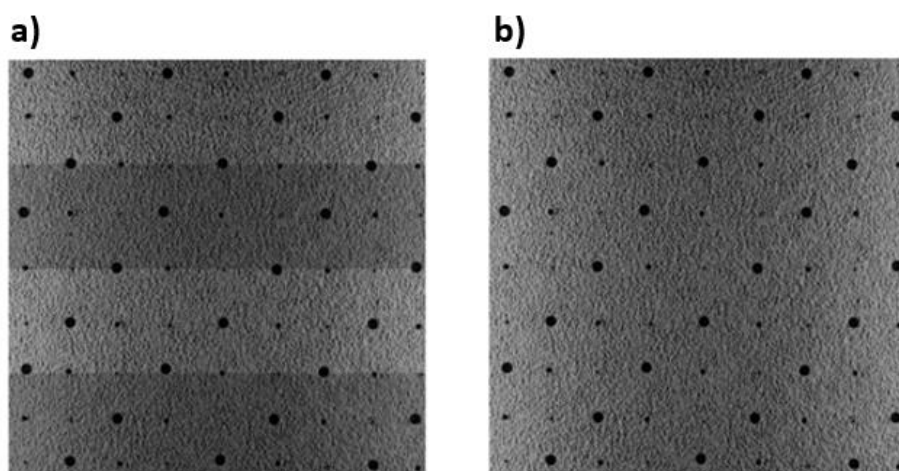
W przypadku drugiego sposobu obliczeń wnioski są analogiczne. Ponadto, przy zastosowaniu drugiego sposobu otrzymano mniejszy maksymalny błąd względny dla analizowanych powierzchni, co może sugerować, że obliczanie porowatości na podstawie średniej uzyskanej dla wszystkich zdjęć danej powierzchni może dawać bardziej wiarygodne wyniki.

Biorąc dodatkowo pod uwagę wyniki precyzji pomiaru (niższa precyzja pomiaru dla wariantu W3), do dalszego etapu badań zaklasyfikowano warianty W4, W7 i W8:

- **wariant W4:** Algorytm Progowania Sauvola -> erozja kwadratowym elementem strukturalnym w o boku 2 pikseli powtórzona 8 razy -> usuwanie elementów mniejszych niż 10 pikseli -> dyfuzja kwadratowym elementem strukturalnym o boku 2 pikseli powtórzona 8 razy,
- **wariant W7:** Algorytm Progowania Sauvola -> erozja elementem strukturalnym w kształcie koła o średnicy 8 pikseli -> usuwanie elementów mniejszych niż 8 pikseli -> dyfuzja elementem strukturalnym w kształcie koła o średnicy 8 pikseli,
- **wariant W8:** Algorytm Progowania Sauvola -> erozja elementem strukturalnym w kształcie koła o średnicy 8 pikseli -> usuwanie elementów mniejszych niż 10 pikseli -> dyfuzja elementem strukturalnym w kształcie koła o średnicy 8 pikseli.

9.1.3. Wpływ przebarwień na wynik pomiaru porowatości

W etapie 3., w pierwszej kolejności sprawdzono wpływ przebarwień na wynik pomiaru porowatości. Badanie polegało na wykonaniu 7 zdjęć każdej z 31 wybranych powierzchni, wśród których znalazły się powierzchnie modelowe (1÷22), powierzchnia wzornika bieli (29) oraz płyty betonowe (30÷37). Następnie porównano obliczoną powierzchnię porów z wynikami dla tej samej powierzchni, do której dodano przebarwienia w formie dwóch poziomych pasów, obliczając błąd względny. W dalszej kolejności wyznaczono maksymalny błąd względny spośród otrzymanych wyników dla każdego wariantu i klasy chropowatości powierzchni. Wyniki przedstawiono w Tab. 9.6, im mniejszy maksymalny błąd względny tym większa była dokładność pomiaru. Porównanie przykładowej pary powierzchni pokazano na Rys. 9.3.



Rys. 9.3. Zdjęcie powierzchni modelowej nr 13 z komputerowo dodanymi przebarwieniami (a) oraz bez przebarwień (b)

Tab. 9.7. Zagregowane wyniki pomiaru udziału procentowego porów w postaci maksymalnego błędu względnego dla każdej klasy powierzchni

Nr wariantu obl.	Nazwa wariantu	Klasa chropowatości powierzchni	Maksymalny błąd względny [%]
4	sauvola_2x2_8_10_8	0 i 1*	1,05
		2	0,18
		3	20,86
		4	5,33
		5	7,79
7	sauvola_circle_8_8_8	0 i 1*	1,12
		2	0,24
		3	27,81
		4	3,58
		5	15,66
8	sauvola_circle_8_10_8	0 i 1*	1,04
		2	0,23
		3	19,37
		4	3,68
		5	3,64

* - w przypadku klas 0 i 1 wyniki zostały połączone ze względu na małą chropowatość obydwu klas

Analizując wyniki, można zauważyć, że w przypadku powierzchni o małej chropowatości (klasy 0 i 1), otrzymano porównywalne i niskie wartości maksymalnego błędu względnego (poniżej 1%), przy wykorzystaniu każdego z 3 analizowanych wariantów obliczeniowych.

Powierzchnie klasy 2 (powierzchnia papieru ściernego P120), charakteryzują się niską wartością błędu względnego (poniżej 0,3%) uzyskaną przy wykorzystaniu każdego z 3 analizowanych wariantów, co wskazuje na ich wysoką skuteczność w analizie tego typu powierzchni.

W przypadku powierzchni klas chropowatości 3 i 4 widoczny jest wzrost błędu względnego przy wykorzystaniu wszystkich wariantów obliczeniowych, szczególnie wysoki wynik uzyskując w przypadku powierzchni klasy 3 (powyżej 19%).

W przypadku powierzchni klasy 5, która obejmuje powierzchnie betonowe o zróżnicowanej chropowatości, obserwujemy znaczące różnice w uzyskanych wynikach dokładności pomiaru porowatości. Najniższą wartość maksymalnego błędu względnego dla tej klasy otrzymano przy wykorzystaniu wariantów W4 i W8 - odpowiednio 7,79 i 3,64. W połączeniu z wysokim wynikiem przy wykorzystaniu wariantu W7 (15,66), można domniemywać, że usuwanie w trakcie operacji morfologicznych elementów o wielkości do 10 pikseli (zastosowane w wariantach W4 i W8) daje lepsze rezultaty od usuwania elementów o wielkości do 8 pikseli (zastosowane w wariantach W7).

9.1.4. Wpływ chropowatości na wynik pomiaru porowatości

W celu przeprowadzenia analizy wpływu chropowatości na wynik pomiaru porowatości powierzchni, dodano komputerowo pory do powierzchni modelowych jasnoszarych o różnej klasie chropowatości pozbawionych porów (17, 18, 19, 23) oraz analogicznych powierzchni modelowych ciemnoszarych (20, 21, 22, 24). Każdej z wymienionych 8 powierzchni wykonano 7 zdjęć. Do każdego wykonanego zdjęcia powierzchni dodano pory zgodnie z zestawieniem w Tab. 8.4. Dla każdego z obrazów obliczono powierzchnię porów wykorzystując 3 warianty algorytmu obliczeniowego, W4, W7 i W8, otrzymując tym samym 2016 wyników. Następnie porównano obliczoną powierzchnię porów na powierzchniach o danym poziomie chropowatości z obliczoną powierzchnią porów na powierzchniach gładkich dla danego koloru, stosując jako miarę dokładności błąd względny. W dalszej kolejności wyznaczono maksymalny błąd względny dla każdej kombinacji wariantu obliczeniowego, koloru powierzchni i średnicy otworów i klasy chropowatości porównywanej powierzchni (Tab. 9.8).

Tab. 9.8. Wpływ chropowatości powierzchni na wyniki pomiarów wyrażony zmianą maksymalnego błędu względnego

Nr wariantu obl.	Kolor powierzchni	Średnica otworów	Maksymalny błąd względny [%] (powierzchnia kl. 2)	Maksymalny błąd względny [%] (powierzchnia kl. 3)	Maksymalny błąd względny [%] (powierzchnia kl. 4)
W4	jasnoszary	1mm	11,41	26,74	6081,82
		2mm	3,52	13,67	4341,83
		4mm	2,05	9,74	3591,10
	ciemnoszary	1mm	14,30	118,55	12443,68
		2mm	2,49	76,55	8896,30
		4mm	0,84	61,36	7342,69
W7	jasnoszary	1mm	4,97	33,47	11094,98
		2mm	2,39	24,55	9184,33
		4mm	0,64	20,21	7569,45
	ciemnoszary	1mm	8,38	671,28	18436,46
		2mm	3,08	553,06	15264,34
		4mm	0,94	454,68	12571,49
W8	jasnoszary	1mm	4,97	26,15	10671,78
		2mm	2,39	16,85	8824,57
		4mm	0,64	13,87	7278,54
	ciemnoszary	1mm	8,38	545,36	17860,88
		2mm	3,08	444,69	14785,97
		4mm	0,94	365,99	12179,17

Analizując wyniki, pierwszym widocznym trendem jest spadek maksymalnego błędu względnego wraz ze wzrostem średnicy otworów, niezależnie od koloru i chropowatości powierzchni. Ponadto, wzrost chropowatości powierzchni prowadzi do znacznego wzrostu błędu względnego dla wszystkich wariantów algorytmu. Jest to szczególnie widoczne w przypadku powierzchni ciemnoszarych.

Dla powierzchni klasy 2 (powierzchnia papieru ściernego P120), najlepsze wyniki uzyskano przy zastosowaniu wariantów obliczeniowych W7 i W8, otrzymując identyczne wyniki, znacząco lepsze od tych, uzyskanych z zastosowaniem wariantu W4. W przypadku powierzchni

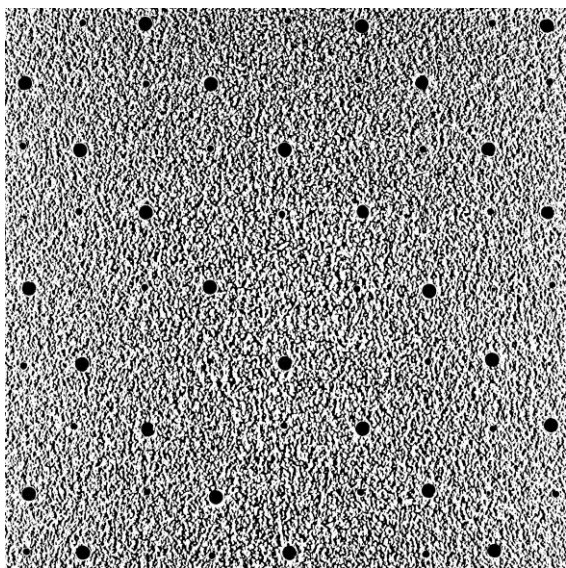
chropowatych klasy 3 i 4 uzyskano wielokrotnie większy maksymalny błąd względny niż w przypadku powierzchni klasy 2, niezależnie od wariantu obliczeniowego.

9.1.5. Miara oceny porowatości

Podsumowując skuteczność analizowanych wariantów obliczeniowych, można stwierdzić, że:

- największą precyzję pomiaru uzyskano w przypadku zastosowania wariantu W7 i W8 (współczynnik zmienności 0,08%). Przy zastosowaniu wariantu W4 uzyskano nieznacznie gorszy wynik (0,1%),
- największą dokładność detekcji porów uzyskano przy zastosowaniu wariantów obliczeniowych opartych na algorytmie Sauvola. Najlepsze wyniki uzyskano w przypadku zastosowania wariantu W7 i W8. Różnice widoczne są w szczególności dla porów o średnicy 1mm (3,55 dla wariantów W7 i W8 oraz 16,24 dla wariantu W4),
- obliczanie porowatości na podstawie średniej z 7 zdjęć dało nieznacznie niższy maksymalny błąd względny niż w przypadku obliczeń na podstawie pojedynczych zdjęć,
- w badaniu wpływu przebarwień na wynik detekcji porów na powierzchniach w klasie chropowatości 1 i 2, wszystkie warianty obliczeniowe dały dobre wyniki, poniżej 1,5%. Z kolei, w przypadku klas chropowatości 3 i 4, zaobserwowano wyraźny spadek dokładności pomiaru. Nieznacznie lepsze wyniki uzyskano przy zastosowaniu wariantu W8 w przypadku powierzchni o klasie chropowatości 1 i 2. W przypadku powierzchni betonowych najlepsze wyniki uzyskano przy zastosowaniu wariantu W8,
- w badaniu wpływu chropowatości na wynik detekcji porów na powierzchniach chropowatości klasy 2, najwyższą dokładność uzyskano przy zastosowaniu wariantów obliczeniowych W7 i W8 - w obu wariantach uzyskano identyczne wyniki. W przypadku powierzchni o klasie chropowatości 3 i 4 wszystkie warianty obliczeniowe dały wielokrotnie większy maksymalny błąd względny niż w klasie 2.

Biorąc pod uwagę wszystkie przeprowadzone badania, można stwierdzić, że ograniczeniem proponowanej metody jest brak możliwości oceny porów o średnicy poniżej 1 mm. Ponadto, proponowana metoda nie może być stosowana na powierzchniach charakteryzujących się dużą chropowatością. Niemniej jednak sprawdzi się przy powierzchniach, których chropowatość nie przekracza chropowatości papieru o gramaturze P120. Na Rys. 9.4 przedstawiono obraz powierzchni o dużej chropowatości, gdzie nierówności powierzchni zostały uznane przez algorytm za pory.



Rys. 9.4. Powierzchnia modelowa nr 16 po operacji binaryzacji algorytmem Sauvola bez dodatkowych operacji morfologicznych. Widoczne otwory o średnicy 4 i 2 mm, brak widoczności porów o średnicy 1 mm

Wykorzystanie próbek modelowych o kontrolowanych parametrach kolorystyki i struktury geometrycznej powierzchni zapewniło, że uzyskane wyniki są reprezentatywne w kontekście oceny powierzchni betonu. Na tej podstawie można stwierdzić, że proponowana metoda może być stosowana do oceny porowatości gładkiego betonu architektonicznego. Za najlepszy wariant obliczeniowy służący tej ocenie można uznać algorytm oparty na binaryzacji obrazu progowaniem lokalnym Sauvola, po którym następuje operacja erozji za pomocą elementu strukturalnego w kształcie koła o średnicy 8 pikseli, usunięcie elementów o wielkości 10 pikseli, a następnie operacja dylatacji elementem strukturalnym w kształcie koła o średnicy 8 pikseli.

Po wyłonieniu najlepszego algorytmu mierzenia porowatości na danym zdjęciu, przystąpiono do wyboru parametrów statystycznych określających porowatość powierzchni. W tym celu stworzono 4 warianty obrazu powierzchni o wymiarach 15x15 cm i różnej porowatości:

- 4 pory $\varnothing 2$ mm i 3 pory $\varnothing 1$ mm - udział procentowy porów około 0,06%,
- 8 porów $\varnothing 2$ mm i 6 porów $\varnothing 1$ mm - udział procentowy porów około 0,13%,
- 12 pory $\varnothing 2$ mm i 9 porów $\varnothing 1$ mm - udział procentowy porów około 0,19%,
- 16 porów $\varnothing 2$ mm i 12 porów $\varnothing 1$ mm - udział procentowy porów około 0,26%.

Warianty te stworzono komputerowo, poprzez nałożenie porów o średnicy 1 i 2 mm na zdjęcie powierzchni nr 23 pozbawionej porów, o wymiarach 15x15 cm, wykonane w warunkach oświetleniowych właściwych dla pomiaru porowatości powierzchni. Każdy obraz odzwierciedla jeden wykonany pomiar. Aby sprawdzić całą powierzchnię, pomiar należy wielokrotnie powtórzyć w różnych miejscach. Liczba wykonanych pomiarów może różnić się w zależności od wielkości powierzchni. W zasymulowanym badaniu przyjęto, że w celu uzyskania reprezentatywnych wyników dla danej powierzchni, wykonano 12 pomiarów. Aby ocenić użyteczność poszczególnych parametrów statystycznych do oceny porowatości, wykonano badanie symulujące 6 powierzchni o niejednorodnym rozkładzie porów. Powierzchnie te zostały zamodelowane przy użyciu wcześniej opisanych obrazów o różnej porowatości (Rys. 9.5).



Rys. 9.5. Wyniki badań symulujących 6 powierzchni o niejednorodnym rozkładzie porów: 1) powierzchnia o równomierne rozłożonych porach, udział procentowy porów równy 0,13%; 2) powierzchnia z nierównomiernym ułożeniem porów, średni udział procentowy porów równy 0,13%; 3) powierzchnia o równomierne rozłożonych porach, udział procentowy porów równy 0,06%; 4) powierzchnia o małej porowatości z obszarem o podwyższonej porowatości zajmującym 1/12 powierzchni; 5) powierzchnia o małej porowatości z obszarem o podwyższonej porowatości zajmującym 1/6 powierzchni; 6) powierzchnia o podwyższonej porowatości z obszarem o zerowej porowatości zajmującym 1/6 powierzchni

Dla każdej powierzchni zmierzono udział procentowy porów na każdym obrazie składowym, a następnie obliczono następujące parametry statystyczne porowatości powierzchni:

- średnia powierzchnia porów,
- mediana,
- średnia kwadratowa,
- wariancja,
- odchylenie standardowe,
- współczynnik zmienności [%],
- średnia porowatość powyżej 80 percentyla,
- średnia porowatość powyżej 90 percentyla.

Tab. 9.9. Poszczególne parametry statystyczne porowatości uzyskane dla symulowanych powierzchni 1 ÷ 6 o różnym rozkładzie porów

Miara porowatości	Nr powierzchni					
	1	2	3	4	5	6
średnia powierzchnia porów	0,129	0,129	0,064	0,080	0,096	0,161
mediana	0,129	0,129	0,064	0,064	0,064	0,193
średnia kwadratowa	0,129	0,139	0,064	0,096	0,120	0,176
wariancja	0,000	0,003	0,000	0,003	0,006	0,006
odchylenie standardowe	0,000	0,055	0,000	0,056	0,075	0,075
współczynnik zmienności [%]	0,000	42,639	0,028	69,292	77,860	46,710
średnia porowatość powyżej 80 percentyla	0,129	0,193	0,064	0,084	0,103	0,193
średnia porowatość powyżej 90 percentyla	0,129	0,193	0,064	0,084	0,257	0,193

Otrzymane wyniki wskazują, że dobrym kierunkiem może być przyjęcie dwóch parametrów statystycznych do opisu powierzchni: jednego opisującego udział procentowy porów na całej powierzchni wyrażony za pomocą średniej lub mediany, drugi opisujący zmienność udziału porów opisany odchyleniem standardowym lub współczynnikiem zmienności. W celu potwierdzenia wniosków, konieczne było przeprowadzenie badań walidacyjnych na istniejących obiektach budowlanych.

9.2. Badania kolorystyki

9.2.1. Oznaczenie dokładności i precyzji pomiaru na wzornikach koloru NCS

Głównym celem badań modelowych kolorystyki było wyłonienie najlepszego algorytmu korekcji kolorystyki otrzymanych zdjęć. W ramach pierwszego etapu badań sprawdzono warianty algorytmu korekcji kolorystycznej podane w Tab. 9.10. Proces korekcji kolorystycznej przebiega dwuetapowo. W pierwszym etapie oblicza się wielomianową funkcję korekcyjną dla każdej z trzech składowych kolorystycznych w danej przestrzeni barw na bazie zdjęcia wzornika kolorów. Następnie dokonuje się korekcji kolorystycznej każdego piksela korygowanego obrazu poprzez zaaplikowanie funkcji korekcyjnych.

Tab. 9.10. Zestawienie parametrów testowanych wariantów algorytmu korekcji kolorystycznej

Nr wariantu obliczeniowego	Przestrzeń barw przy kalibracji	Stopień wielomianu funkcji mapującej	Nr odczytu wzornika kolorów
K1	RGB	2	1
K2	CIELAB	2	1
K3	XYZ	2	1
K4	RGB	3	1
K5	CIELAB	3	1
K6	XYZ	3	1
K7	RGB	2	2
K8	CIELAB	2	2
K9	XYZ	2	2
K10	RGB	3	2
K11	CIELAB	3	2
K12	XYZ	3	2

W pierwszym etapie badań dokonano korekcji kolorystycznej zdjęć powierzchni modelowych nr 25, 26 oraz 27 - wzorników koloru odpowiednio; NCS S 0500-N (biały), NCS S 2500-N (jasny szary) oraz NCS S 5000-N (ciemny szary). Każdej powierzchni wykonano 7 zdjęć, które w dalszej kolejności poddano korekcji każdym z 12 wariantów algorytmu korekcji kolorystycznej. Następnie porównano średni kolor skorygowanego zdjęcia ze znanym kolorem dla każdego wzornika, obliczając podobieństwo kolorystyczne $\Delta E(RGB)$ oraz $\Delta E(Lab)$, zgodnie ze wzorami (8.2) i (8.3). Maksymalne otrzymane wartości przedstawiono w Tab. 9.11. Mniejsza wartość ΔE oznacza bardziej podobne kolory.

Tab. 9.11. Maksymalne średnie wartości odległości między obliczonym kolorem a kolorem teoretycznym wzorników NCS S 0500-N, NCS S 2500-N oraz NCS S 5000-N po korekcji kolorystycznej

Nr wariantu obliczeniowego	Max $\Delta E(RGB)$ między obliczonym średnim kolorem powierzchni a wartościami teoretycznymi	Max $\Delta E(Lab)$ między obliczonym średnim kolorem powierzchni a wartościami teoretycznymi
K1	20,06	3,29
K2	21,62	3,79
K3	18,54	3,64
K4	26,43	3,94
K5	17,30	2,11
K6	24,34	5,18
K7	33,71	5,03
K8	34,89	4,66
K9	32,34	6,02
K10	37,58	5,26
K11	36,74	4,60
K12	34,82	8,96

Analizując wyniki można stwierdzić, że najlepsze wyniki uzyskano przy zastosowaniu wariantu K5. Uzyskana różnica kolorystyczna równa 2,11 oznacza, że różnica między otrzymanym kolorem a kolorem teoretycznym jest ledwo dostrzegalna przez niedoświadczonego obserwatora, zgodnie z klasyfikacją przyjętą w Tab. 5.1.

Kolejnym badaniem sprawdzającym jakość kalibracji kolorystycznej było określenie dokładności pomiaru podobieństwa kolorystycznego między kolorami. Wzorniki koloru NCS połączono w pary między sobą, aby sprawdzić każdą ich kombinację. Jako miarę dokładności, każdorazowo zastosowano błąd względny pomiędzy zmierzonym wynikiem a wartością teoretyczną. W badaniu wykorzystano po 7 zdjęć każdego z 3 wzorników NCS poddanych kalibracji każdym z 12 wariantów algorytmu korekcji kolorystycznej. Badanie wykonano na dwa sposoby.

W pierwszym sposobie kolor wzornika obliczono osobno dla każdego z 7 wykonanych zdjęć. Następnie obliczono błąd względny pomiędzy uzyskanym wynikiem różnicy kolorystycznej między parami wzorników a różnicą uzyskaną z porównania z wartością teoretyczną, po czym

wyznaczono maksymalny błąd względny dla każdej pary wzorników. W Tab. 9.12 przedstawiono uzyskane wyniki dla wariantu 1.

W drugim sposobie kolor każdego wzornika obliczono jako średnią z 7 wykonanych zdjęć. Następnie obliczono błąd względny pomiędzy uzyskanym wynikiem różnicy kolorystycznej między parami wzorników a różnicą uzyskaną z porównania z wartością teoretyczną. W Tab. 9.13 przedstawiono uzyskane wyniki dla sposobu 2.

Tab. 9.12. Dokładność kalibracji kolorystycznej wyrażona jako maksymalny błąd względny różnicy kolorystycznej między poszczególnymi parami wzorników NCS, wariant przy obliczaniu koloru wzornika osobno dla każdego z 7 zdjęć

Nr wariantu obliczeniowego	Maksymalny błąd względny $\Delta E(RGB)$ [%]			Maksymalny błąd względny $\Delta E(Lab)$ [%]		
	między NCS 500 a NCS 2500	między NCS 500 a NCS 5000	między NCS 2500 a NCS 5000	między NCS 500 a NCS 2500	między NCS 500 a NCS 5000	między NCS 2500 a NCS 5000
K1	6,51	1,94	5,38	9,25	3,25	4,43
K2	6,60	1,55	6,07	8,05	2,94	5,39
K3	7,19	3,03	3,77	8,20	2,67	6,63
K4	9,63	6,86	4,02	7,53	6,78	6,63
K5	2,27	3,00	3,91	2,91	2,80	2,71
K6	6,43	3,22	2,79	12,05	4,07	3,55
K7	4,94	2,01	7,49	7,50	1,34	7,33
K8	7,15	1,34	8,30	9,41	2,25	6,74
K9	6,68	1,67	6,10	6,76	2,37	8,15
K10	8,02	7,67	7,21	9,95	7,93	7,21
K11	6,93	6,25	5,50	7,53	5,81	5,39
K12	5,63	3,99	2,58	16,85	8,29	3,32

Tab. 9.13. Dokładność kalibracji kolorystycznej wyrażona jako błąd względny średniej różnicy kolorystycznej między poszczególnymi parami wzorników NCS, wariant przy obliczaniu koloru wzornika jako średniej z 7 zdjęć

Nr wariantu obliczeniowego	Błąd względny $\Delta E(RGB)$ [%]			Błąd względny $\Delta E(Lab)$ [%]		
	między NCS 500 a NCS 2500	między NCS 500 a NCS 5000	między NCS 2500 a NCS 5000	między NCS 500 a NCS 2500	między NCS 500 a NCS 5000	między NCS 2500 a NCS 5000
K1	5,67	1,21	3,25	8,05	2,47	2,93
K2	5,86	0,87	4,10	6,68	2,05	3,24
K3	6,50	2,44	1,67	6,82	1,77	3,07
K4	8,82	5,62	2,30	7,05	5,17	3,77
K5	1,40	1,85	2,25	1,82	1,46	1,08
K6	5,67	1,88	1,89	8,49	3,04	2,04
K7	4,21	0,68	5,57	6,22	0,62	5,11
K8	6,41	0,20	6,06	7,94	1,29	5,25
K9	5,95	0,96	4,10	5,52	0,96	3,42
K10	7,16	6,29	5,26	7,90	6,79	6,01
K11	6,08	4,77	3,31	5,87	4,50	3,35
K12	4,70	2,80	1,13	15,37	7,36	1,77

Analizując dane zaprezentowane w Tab. 9.12 i 9.13, można zauważyć, że najlepsze rezultaty otrzymano przy zastosowaniu wariantu algorytmu obliczeniowego K5, uzyskując przy zastosowaniu sposobu drugiego, błąd względny poniżej 2% przy zastosowaniu podobieństwa kolorystycznego $\Delta E(Lab)$. W przypadku każdego wariantu obliczeniowego otrzymano mniejszy błąd względny przy wykorzystaniu średniej z 7 pomiarów w porównaniu do maksymalnego błędu względnego otrzymanego osobno dla każdego z 7 zdjęć wzornika.

Poza sprawdzeniem dokładności pomiaru, sprawdzono także precyzję pomiaru koloru wzorników NCS w przestrzeni sRGB. W tym celu każdemu ze wzorników koloru NCS wykonano po 7 zdjęć, które następnie poddano korekcji kolorystycznej za pomocą każdego z 12 wariantów obliczeniowych, co łącznie dało 252 wyniki. Następnie sprawdzono wartości składowych RGB każdego ze zdjęć po korekcji kolorystycznej oraz obliczono współczynnik zmienności pomiaru każdej składowej dla każdego wzornika. Dodatkowo obliczono minimalną liczbę prób potrzebną do uzyskania zakładanej dokładności pomiaru (1,0 i 2,0 co odpowiada granicy rozróżnialności kolorów przez doświadczonego i niedoświadczonego obserwatora).

Tab. 9.14. Precyzja pomiaru kolorystyki wyrażona współczynnikiem zmienności oraz minimalna liczba prób potrzebna do uzyskania założonej dokładności pomiaru dla różnych wariantów algorytmu kalibracji kolorystycznej

Nr wariantu obliczeniowego	Maksymalny współczynnik zmienności [%]	Minimalna liczba prób (dokł. 1,0)	Minimalna liczba prób (dokł. 2,0)
K1	0,58	5	2
K2	0,57	5	2
K3	0,63	6	2
K4	0,56	4	1
K5	0,53	4	1
K6	0,73	8	2
K7	0,56	5	2
K8	0,62	6	2
K9	0,62	6	2
K10	0,57	5	2
K11	0,62	6	2
K12	0,48	4	1

Analizując dane zawarte w tabeli, można zauważyć, że uzyskane wyniki są zbliżone do siebie niezależnie od zastosowanego wariantu obliczeniowego. Najlepsze wyniki uzyskano dla wariantów K12, K5, K7 i K4.

9.2.2. Wpływ porowatości na wynik pomiaru kolorystyki

W kolejnym etapie badań zweryfikowano wpływ porowatości oraz chropowatości na wynik pomiaru koloru. Weryfikację przeprowadzono dla wszystkich wariantów algorytmu kalibracji. W pierwszej kolejności sprawdzono wpływ porowatości na wynik pomiaru średniego koloru powierzchni. Do tego celu wybrano powierzchnie modelowe 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 23 oraz 24 odpowiadające powierzchniom gładkim bez porów (23 oraz 24) oraz porowatym powierzchniom gładkim (pozostałe powierzchnie). Szczegółowy spis użytych powierzchni modelowych znajduje się w Tab. 9.15.

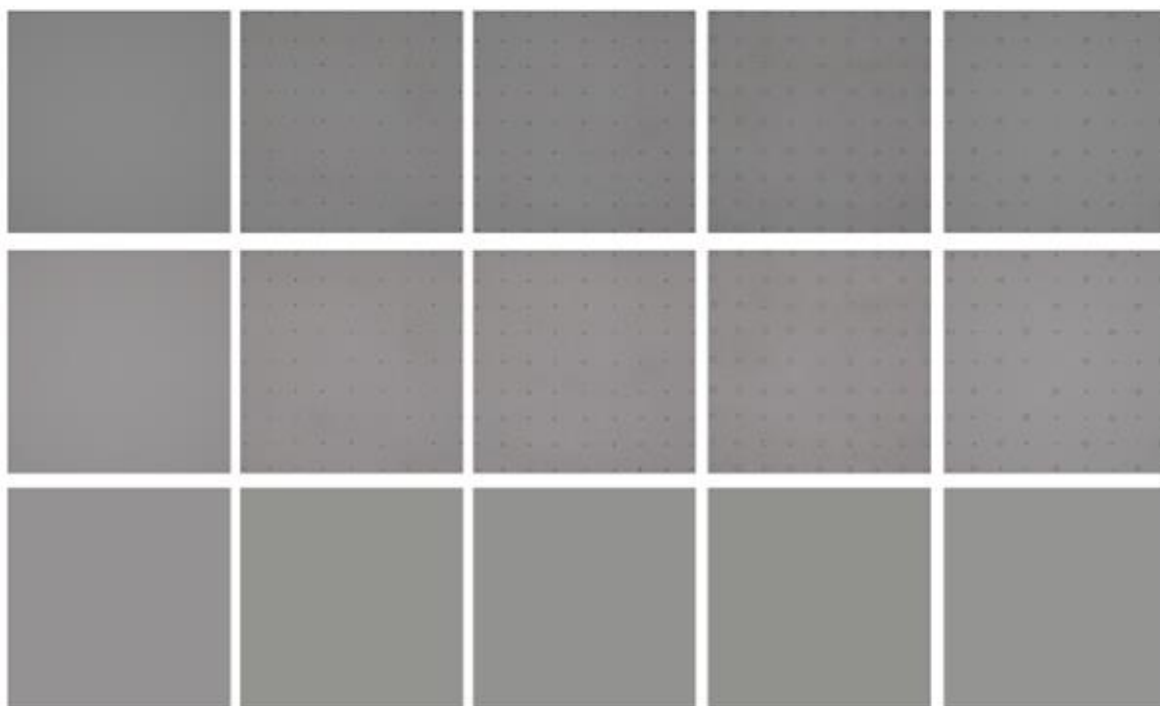
Tab. 9.15. Powierzchnie modelowe użyte do oceny wpływu porowatości na wynik oceny kolorystyki powierzchni

Nr	klasa chropowatości	Kolor	Otworki
1	1	jasnoszary	1 mm
2	1	jasnoszary	2 mm
3	1	jasnoszary	4 mm
4	1	jasnoszary	mix 1
6	1	ciemnoszary	1 mm
7	1	ciemnoszary	2 mm
8	1	ciemnoszary	4 mm
9	1	ciemnoszary	mix 1
23	1	jasnoszary	brak
24	1	ciemnoszary	brak

Legenda Otworki:

1 mm - 81 otworków o średnicy 1mm w regularnych odstępach między środkami co ok. 1,75 mm
2 mm - 81 otworków o średnicy 2mm w regularnych odstępach między środkami co ok. 1,75 mm
4 mm - 81 otworków o średnicy 4mm w regularnych odstępach między środkami co ok. 1,75 mm
mix 1 - po 27 otworków o średnicy 1,2 i 4mm w regularnych odstępach między środkami co ok. 1,75 mm

W pierwszej kolejności, każdą z 10 wybranych powierzchni modelowych sfotografowano 7 razy, a następnie poddano kalibracji kolorystycznej za pomocą każdego z 12 wariantów kalibracji. Następnie dla każdej powierzchni obliczono średni kolor w przestrzeni RGB oraz CIELAB, łącznie otrzymując 1680 wyników. Ostatecznie obliczono różnicę kolorystyczną $\Delta E(RGB)$ i $\Delta E(Lab)$ między każdą z powierzchni porowatych a powierzchnią gładką o tym samym kolorze. Rys. 9.6 przedstawia kolejne etapy obróbki zdjęć na przykładzie 5 jasnoszarych powierzchni modelowych i wariantu korekcji kolorystyki K5. Tab. 9.16 przedstawia zagregowane wyniki w postaci maksymalnych uzyskanych wartości dla każdego wariantu algorytmu kalibracji kolorystycznej.



Rys. 9.6. Porównanie zdjęć przed kalibracją (górny rząd), po kalibracji kolorystycznej (środkowy rząd) oraz średnich kolorów zdjęcia po kalibracji (dolny rząd). Numery powierzchni kolejno od lewej: 23, 1, 2, 3, 4

Tab. 9.16. Maksymalne uzyskane różnice kolorystyczne między powierzchnią porowatą a powierzchnią gładką o tym samym kolorze

Nr wariantu obliczeniowego	Max $\Delta E(RGB)$ między powierzchnią porowatą a powierzchnią gładką	Max $\Delta E(Lab)$ między powierzchnią porowatą a powierzchnią gładką
K1	14,74	2,31
K2	15,53	1,90
K3	14,06	2,44
K4	13,78	1,80
K5	14,46	2,14
K6	13,29	2,24
K7	15,03	2,01
K8	15,62	2,02
K9	14,40	2,10
K10	14,43	1,83
K11	14,30	1,86
K12	13,34	1,81

Wyniki uzyskane przy zastosowaniu każdego z wariantów były porównywalne. Biorąc pod uwagę wyniki otrzymane przy wykorzystaniu różnicy kolorystycznej $\Delta E(Lab)$ można stwierdzić, że uzyskane różnice są na granicy rozróżnialności przez niedoświadczonego obserwatora, według zestawienia z Tab. 5.1.

9.2.3. Wpływ chropowatości na wynik pomiaru kolorystyki

W ramach badań przeprowadzono także ocenę wpływu porowatości sprawdzono wpływ chropowatości na wynik pomiaru średniego koloru powierzchni. Do przeprowadzenia badania wybrano powierzchnie modelowe 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23 i 24 odpowiadające powierzchniom chropowatym pozbawionym porów oraz powierzchniom gładkim (23 i 24). W Tab. 9.17 przedstawiono szczegółowe zestawienie użytych powierzchni modelowych.

Tab. 9.17. Powierzchnie modelowe użyte do oceny wpływu chropowatości na wynik oceny kolorystyki powierzchni

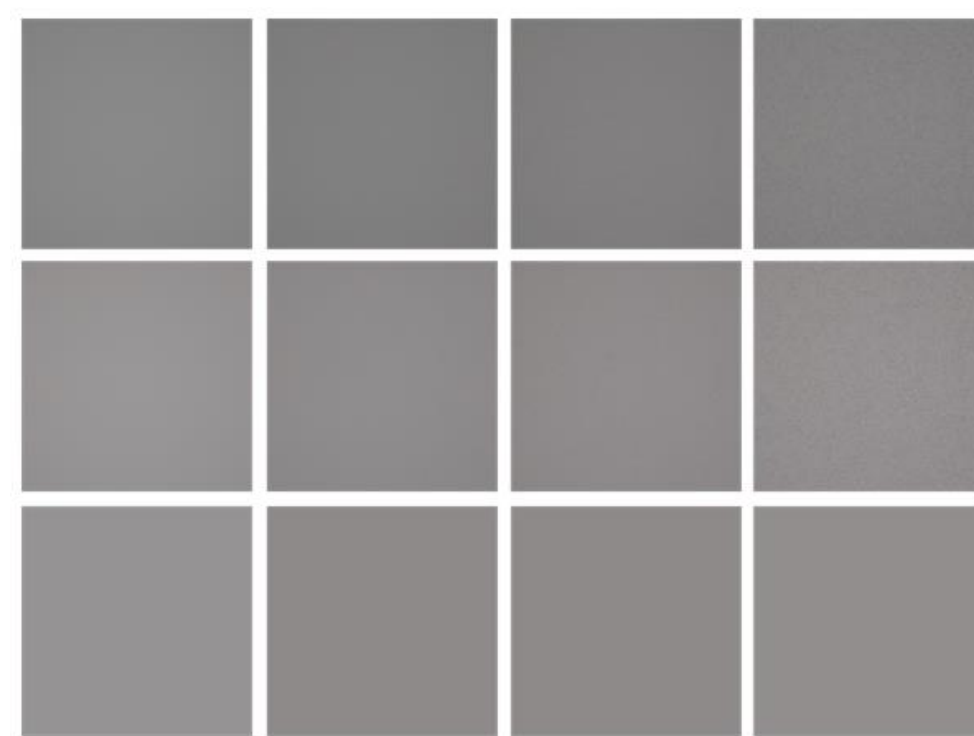
Nr	Klasa chropowatości	Kolor	Otwory	Powierzchnia
17	2	jasnoszary	brak	papier P120
18	3	jasnoszary	brak	papier P80
19	4	jasnoszary	brak	papier P40
20	2	ciemnoszary	brak	papier P120
21	3	ciemnoszary	brak	papier P80
22	4	ciemnoszary	brak	papier P40
23	1	jasnoszary	brak	gładka
24	1	ciemnoszary	brak	gładka

Legenda klasa chropowatości:

- 1 - powierzchnia gładka z drobną fakturą farby
- 2 - powierzchnia lekko chropowata (papier ścierny gradacji P120)
- 3 - powierzchnia średnio chropowata (papier ścierny gradacji P80)
- 4 - powierzchnia mocno chropowata (papier ścierny gradacji P40)

Badanie polegało na wykonaniu 7 zdjęć wszystkim z 8 powierzchni modelowych, a następnie poddaniu każdego obrazu kalibracji kolorystycznej za pomocą każdego z 12 wariantów. Następnie dla każdej sfotografowanej powierzchni obliczono średni kolor w przestrzeni RGB

oraz CIELAB, otrzymując łącznie 1344 wyniki. W dalszej kolejności obliczono średnią różnicę kolorystyczną między każdą z powierzchni chropowatych a powierzchnią gładką o tym samym kolorze. Na Rys. 9.7 przedstawiono kolejne etapy obróbki zdjęć na przykładzie jasnoszarych powierzchni modelowych użytych w badaniu. W Tab. 9.18 przedstawiono wyniki w postaci maksymalnych wyników $\Delta E(RGB)$ i $\Delta E(Lab)$ uzyskanych dla każdego wariantu algorytmu kalibracji kolorystycznej.



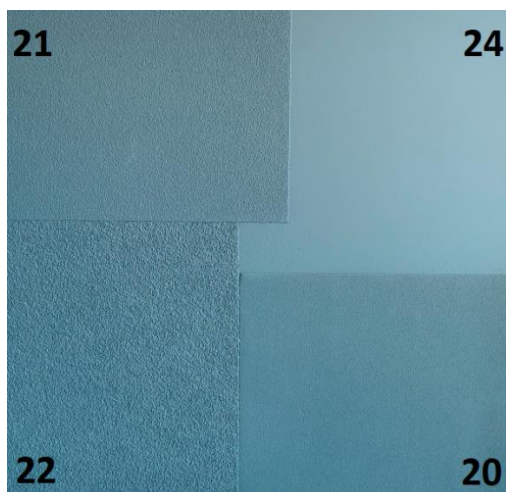
Rys. 9.7. Porównanie zdjęć przed obróbką (górny rząd), po kalibracji kolorystycznej (środkowy rząd) oraz średnich kolorów zdjęcia po kalibracji (dolny rząd). Numery powierzchni kolejno od lewej: 23, 17, 18, 19

Tab. 9.18. Maksymalne różnice kolorystyczne między powierzchnią chropowatą a powierzchnią gładką o tym samym kolorze

Nr wariantu obliczeniowego	Max $\Delta E(RGB)$ między powierzchnią chropowatą a powierzchnią gładką	Max $\Delta E(Lab)$ między powierzchnią chropowatą a powierzchnią gładką
K1	33,40	4,71
K2	34,15	5,06
K3	33,03	4,65
K4	31,92	4,81
K5	33,61	4,70
K6	33,45	4,76
K7	33,96	4,76
K8	34,29	5,04
K9	33,70	4,49
K10	32,72	4,39
K11	33,83	4,81
K12	33,65	4,78

Analizując otrzymane wyniki można zauważyć, że wpływ chropowatości na obliczony kolor powierzchni jest większy niż wpływ porowatości, a różnica w kolorach może być wyraźnie dostrzegalna przez obserwatora, zgodnie z danymi zawartymi w Tab. 5.1.

Oddaje to znany z obserwacji przy świetle dziennym fakt, iż powierzchnie chropowate wydają się być ciemniejsze od gładkich z uwagi na cienie wywołane nierównościami powierzchni. Przykład takiej sytuacji można zaobserwować na Rys. 9.8, na którym pokazano sfotografowane w świetle dziennym powierzchnie modelowe o różnej chropowatości pokryte tą samą farbą. W Tab. 9.19. pokazano zmierzone różnice kolorystyczne na wykonanym zdjęciu między średnim kolorem powierzchni chropowatych a średnim kolorem powierzchni gładkiej. Wyniki te należy traktować wyłącznie poglądowo, ze względu na brak ściśle zdefiniowanych warunków oświetleniowych i brak kalibracji kolorystycznej zdjęcia.



Rys. 9.8. Wybrane powierzchnie modelowe sfotografowane w rozproszonym świetle dziennym

Tab. 9.19. Różnice kolorystyczne pomiędzy zmierzonym średnim kolorem powierzchni gładkiej (24) a zmierzonymi średnimi kolorami powierzchni chropowatych, na podstawie zdjęcia wykonanego w świetle dziennym bez zastosowanej kalibracji kolorystycznej

Nr powierzchni	$\Delta E(RGB)$ badanej powierzchni do powierzchni gładkiej	$\Delta E(Lab)$ badanej powierzchni do powierzchni gładkiej
20	98,17	12,66
21	93,83	11,79
22	114,17	14,88

9.2.4. Wybór wariantu kalibracji kolorystycznej

Podsumowując skuteczność analizowanych wariantów korekcji kolorystyki, można stwierdzić, że:

- najlepsze odtworzenie kolorów wzornika NCS uzyskano przy wykorzystaniu wariantu K5. Maksymalna wartość $\Delta E(Lab)$ wyniosła 2,10, podczas gdy przy wykorzystaniu drugiego najlepszego wariantu uzyskano wynik 3,29 (wariant K1),
- w badaniu dokładności oceny różnic kolorystycznych, najlepsze wyniki otrzymano w przypadku zastosowania wariantu K5 zarówno w przestrzeni RGB jak i CIELAB. Większą dokładność pomiaru kolorystyki uzyskano przy zastosowaniu przestrzeni CIELAB. W przypadku każdego wariantu obliczeniowego otrzymano mniejszy błąd względny przy wykorzystaniu średniej z 7 pomiarów w porównaniu do maksymalnego błędu względnego otrzymanego osobno dla każdego z 7 zdjęć wzornika,

- w badaniu precyzji pomiaru za pomocą współczynnika zmienności, najlepszy wynik uzyskano przy wykorzystaniu wariantów K12, K5, K7 i K4, uzyskując kolejno wyniki: 0,48%; 0,53%; 0,56%; 0,56%,
- w badaniu wpływu porowatości na wynik pomiaru kolorystyki uzyskano zbliżone wyniki dla wszystkich wariantów obliczeniowych ($\max \Delta E(Lab) = 2,1 \pm 0,3$; z wyłączeniem wariantu nr 3),
- w badaniu wpływu chropowatości na wynik pomiaru kolorystyki uzyskano zbliżone wyniki przy wykorzystaniu wszystkich wariantów obliczeniowych ($\max \Delta E(Lab) = 4,7 \pm 0,4$).

Biorąc powyższe pod uwagę, najlepsze wyniki uzyskuje się przy zastosowaniu wariantu K5, w którym użyto kalibracji kolorystycznej z funkcją mapującą stopnia trzeciego oraz przestrzeni CIELAB podczas kalibracji, a także przy wykorzystaniu odczytu nr 1 wzornika kolorów jako bazy do obliczania funkcji korekcyjnych. Ponadto, zdecydowano się na użycie miary podobieństwa kolorystycznego $\Delta E(Lab)$ w toku dalszych badań. Dla tej miary uzyskano lepsze wyniki dokładności pomiaru przy wykorzystaniu wariantu K5, ponadto wykorzystanie różnicy barw przestrzeni barw CIELAB pozwala na łatwą interpretację wyników zgodnie z Tab. 5.1. Stosując opracowaną metodę oceny kolorystyki zdjęcia należy być świadomym możliwego wpływu chropowatości na wynik pomiaru.

9.2.5. Miara oceny dominującego koloru powierzchni

Po wyłonieniu najlepszego algorytmu kalibracji kolorystycznej przystąpiono do wyboru najlepszych parametrów statystycznych opisujących dominujący kolor powierzchni oraz przebarwienia powierzchniowe. W tym celu wykonano badanie symulujące 6 powierzchni o zróżnicowanej kolorystyce (Rys. 9.9). Każda z nich składała się z dwunastu obrazów. Poszczególne składowe obrazy powstały w wyniku przekształcenia kolorystycznego zdjęć powierzchni modelowej nr 23 poprzez punktowe lub całościowe zmniejszenie albo zwiększenie jasności o 70 procent. Wszystkie powierzchnie posiadały zbliżony kolor dominujący (kolor powierzchni nr 23 bez przekształceń kolorystycznych). Powierzchnia 1. nie posiadała żadnych przebarwień. Powierzchnie 2-5 posiadały rosnący udział powierzchni, dla których jasność została obniżona o 70 procent. Powierzchnia nr 6 posiadała równą liczbę obszarów zawierających przebarwienia jasne i ciemne.

Powierzchnia 1.



Powierzchnia 2.



Powierzchnia 3.



Powierzchnia 4.



Powierzchnia 5.



Powierzchnia 6.



Rys. 9.9. Symulowane pomiary sześciu powierzchni. Dla każdej symulowanej powierzchni wykonano 12 pomiarów: 1) powierzchnia równomiernie jasnoszara, 2) powierzchnia równomiernie jasnoszara z jednym ciemnoszarym przebarwieniem zajmującym $1/108$ powierzchni, 3) powierzchnia równomiernie jasnoszara z jednym ciemnoszarym przebarwieniem zajmującym $1/36$ powierzchni, 4) powierzchnia równomiernie jasnoszara z jednym ciemnoszarym przebarwieniem zajmującym $1/12$ powierzchni, 5) powierzchnia równomiernie jasnoszara z jednym ciemnoszarym przebarwieniem zajmującym $1/4$ powierzchni, 6) powierzchnia równomiernie jasnoszara z jednym ciemnoszarym przebarwieniem zajmującym $1/6$ powierzchni oraz jednym jasnoszarym przebarwieniem zajmującym $1/6$ powierzchni

Dla każdego z 12 pól składowych każdej z 6 powierzchni obliczono średni kolor w dwóch wariantach - średni kolor pola 15×15 cm oraz średni kolor 9 pól 5×5 cm będących częściami

składowymi pola 15x15 cm. Sprawdzono następujące warianty obliczania dominującego koloru całej powierzchni:

- średni kolor,
- mediana,
- średnia wyników pomiarów bez uwzględniania obserwacji odstających (odrzucone wyniki poniżej 10 i powyżej 90 percentyla).

Wyniki zaprezentowano w Tab. 9.20.

Tab. 9.20. Podobieństwo kolorystyczne dla wybranych symulowanych powierzchni między wyliczonym kolorem dominującym za pomocą poszczególnych miar, a ustalonym kolorem tła na podstawie średniego koloru zdjęcia powierzchni bez komputerowo zmienionej jasności. Im mniejszy wynik tym podobieństwo większe.

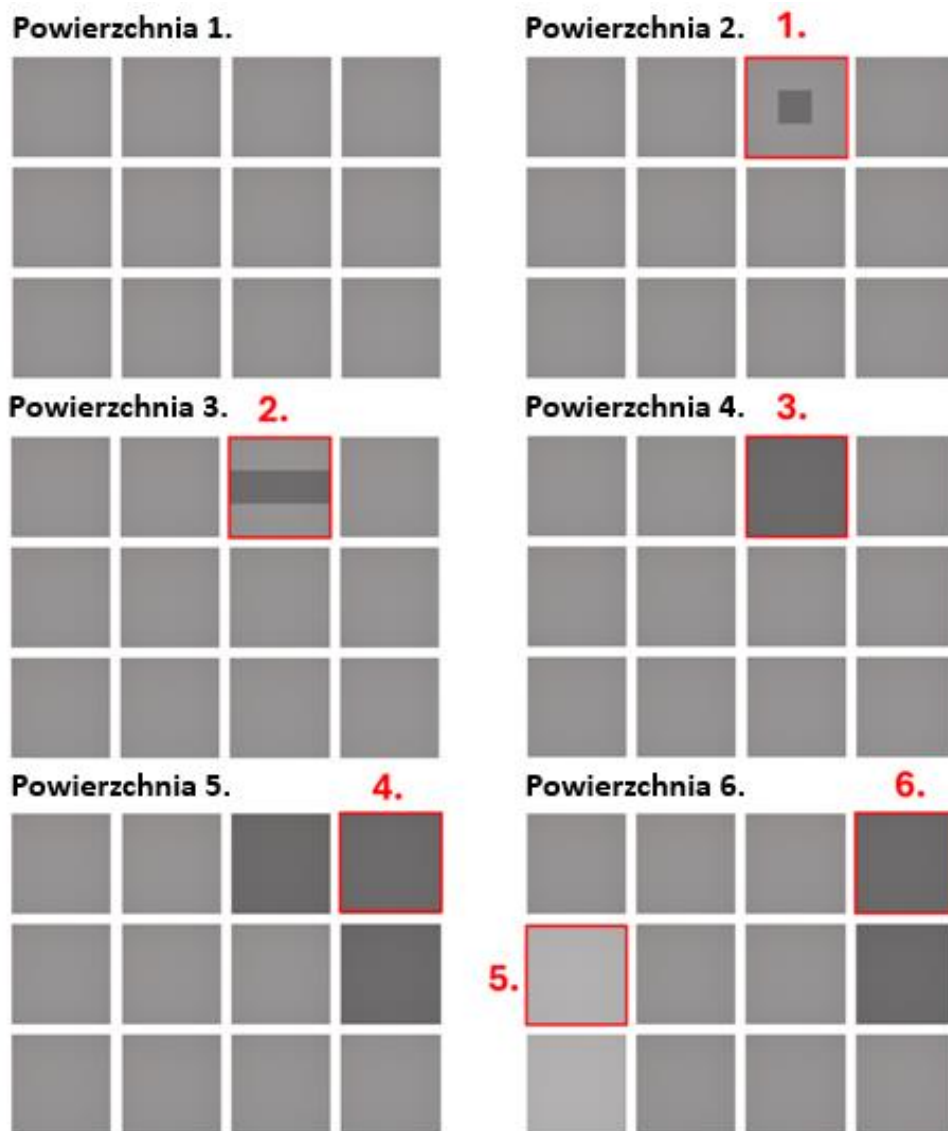
Sposób wyliczania koloru tła	Nr symulowanej powierzchni						Wartość średnia	Wartość max
	1	2	3	4	5	6		
średni kolor (15x15)	0,00	0,13	0,43	1,31	3,99	0,78	1,11	3,99
średni kolor (5x5)	0,05	0,20	0,49	1,37	4,01	0,82	1,16	4,01
mediana (15x15)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
mediana (5x5)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,39	0,00	0,07	0,39
średnia bez obs. ods. (10/90) (15x15)	0,00	0,09	0,09	0,09	2,06	0,05	0,40	2,06
średnia bez obs. ods. (10/90) (5x5)	0,09	0,11	0,11	0,17	3,52	0,66	0,78	3,52

Wyniki badania pokazały, że najlepszy wynik uzyskano przy wykorzystaniu mediany obliczanej na bazie koloru zdjęć 15x15 cm. Miara ta została następnie przyjęta jako sposób wyliczania dominującego koloru powierzchni przy ocenie przebarwień powierzchni.

9.2.6. Miara oceny przebarwień powierzchniowych

W kolejnym etapie sprawdzono proponowane parametry statystyczne opisujące przebarwienia powierzchniowe. W pierwszym kroku przeanalizowano powierzchnie opisane na Rys. 9.9, identyfikując przebarwienia oraz wytypowano pola (symulowane miejsca pomiaru

przebarwienia), na których dokonano pomiaru koloru przebarwienia. W ten sposób zidentyfikowano 6 przebarwień powierzchni (Rys. 9.10). Przebarwienia 1 i 2 potraktowano jako przebarwienia lokalne, które nie powinny mieć wpływu na wynik wykrywania przebarwień powierzchniowych.



Rys. 9.10. Miejsca wykonywania pomiarów przebarwień. Czerwonym kolorem zaznaczone i ponumerowane pola na podstawie których oceniano zidentyfikowane przebarwienia

Dla każdego uzyskanego obrazu 15x15 cm sprawdzono następujące parametry statystyczne: średni kolor obrazu 15x15 cm, medianę koloru obrazu 15x15 cm, średni kolor środkowego pola 5x5 cm, najciemniejszy kolor pola 5x5 cm. Każdy z otrzymanych wyników porównano za pomocą podobieństwa kolorystycznego $\Delta E(Lab)$ z dominującym kolorem powierzchni całego elementu. Wyniki zaprezentowano w Tab. 9.21.

Tab. 9.21. Wyniki oceny symulowanych przebarwień na podstawie podobieństwa kolorystycznego $\Delta E(Lab)$ między dominującym kolorem całej powierzchni a wyliczonym kolorem przebarwienia

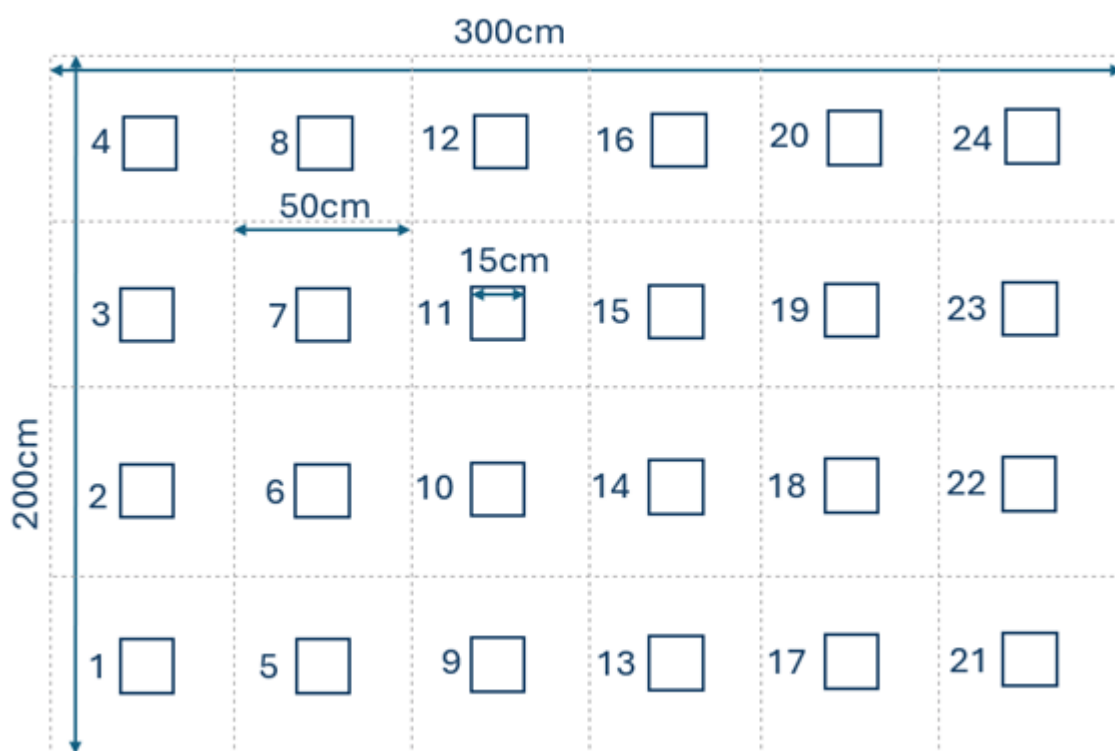
Sposób wyliczania koloru przebarwienia	Nr przebarwienia					
	1	2	3	4	5	6
charakter przebarwienia	lokalne	lokalne	powierzch- niowe	powierzch- niowe	powierzch- niowe	powierzch- niowe
średni kolor	1,57	5,10	15,69	15,69	16,08	11,37
mediana	0,39	0,78	15,69	15,69	16,08	11,37
kolor środkowego pola 5x5	14,90	14,90	14,90	14,90	15,29	12,16
kolor najciemniejszego pola 5x5	14,90	15,69	16,47	16,47	16,47	12,55

Najlepsza miara powinna wskazywać niską różnicę kolorystyczną dla powierzchni 1 i 2 (przebarwienia lokalne) i wysoką różnicę kolorystyczną dla powierzchni 3÷6 (przebarwienia powierzchniowe). Na tej podstawie jako parametr statystyczny opisujący przebarwienia powierzchniowe wybrano medianę koloru pola pomiarowego 15x15 cm.

10. Badania walidacyjne

10.1. Przebieg badań walidacyjnych

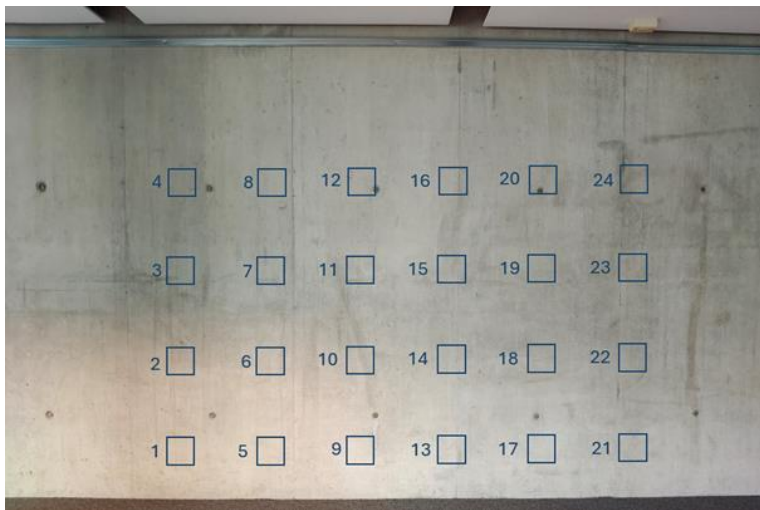
Badania walidacyjne przeprowadzono na terenie dwóch gmachów użyteczności publicznej. Do badań wytypowano 10 powierzchni długości 3 m i wysokości 2 m różniących się kolorystyką, porowatością oraz deskowaniem zastosowanym na etapie konstrukcji, co skutkowało różną fakturą powierzchni. Na każdej powierzchni wyznaczono 24 powierzchnie pomiarowe zgodnie ze schematem przedstawionym na Rys. 10.1, zwane dalej także punktami pomiarowymi. Dodatkowo, jeśli powierzchnia pomiarowa obejmowała otwór po ściągach, wykonano obok dodatkowy pomiar nieobejmujący samego otworu.



Rys. 10.1. Schemat położenia powierzchni pomiarowych na badanych powierzchniach

Powierzchnia 1

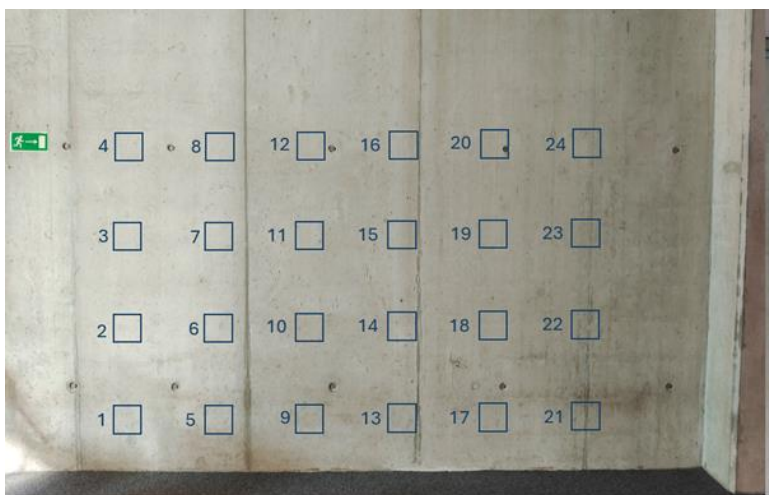
Powierzchnia betonowa o umiarkowanej porowatości i przebarwieniach. Nieznacznie widoczne odciski desek szalunkowych. Ściana ulokowana na parterze budynku nr 1.



Rys. 10.2. Położenie powierzchni pomiarowych na powierzchni nr 1

Powierzchnia 2

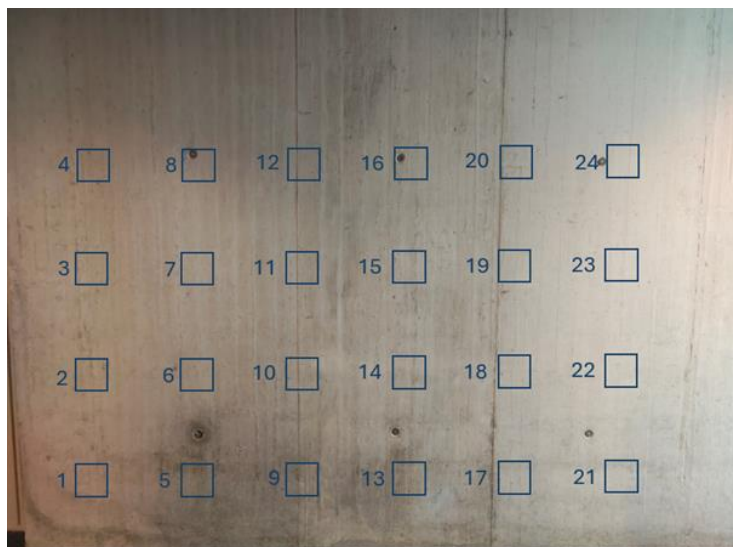
Powierzchnia betonowa o średniej porowatości i niewielkich, ciemnych przebarwieniach. Powierzchnia z umiarkowanie widocznym odciskiem desek szalunkowych. Ściana ulokowana na piętrze budynku nr 1.



Rys. 10.3. Położenie powierzchni pomiarowych na powierzchni nr 2

Powierzchnia 3

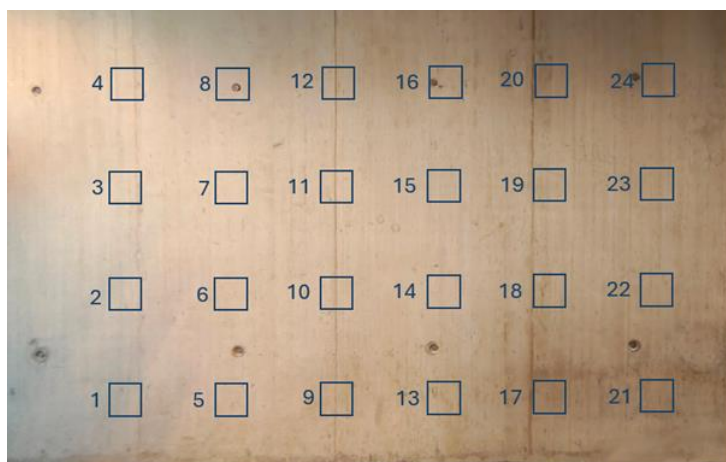
Powierzchnia betonowa o niskiej porowatości i widocznych, ciemnych przebarwieniach. Powierzchnia z dobrze widocznym odciskiem desek szalunkowych. Ściana ulokowana na piętrze budynku nr 1.



Rys. 10.4. Położenie powierzchni pomiarowych na powierzchni nr 3

Powierzchnia 4

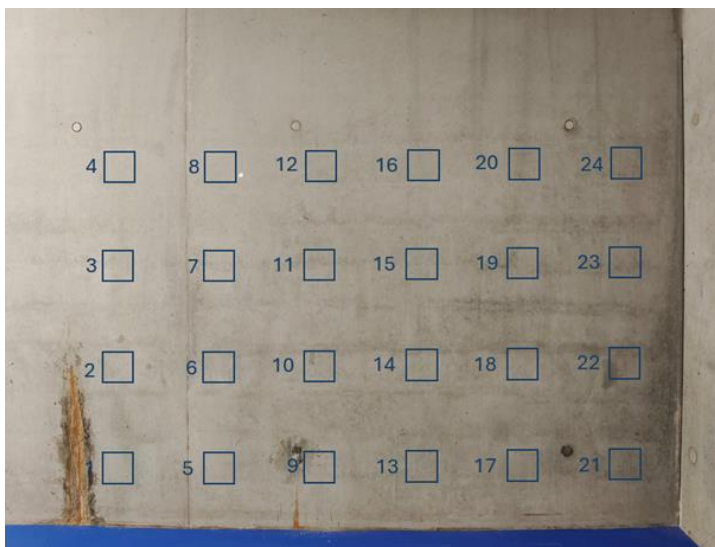
Powierzchnia betonowa o niskiej porowatości i widocznych, ciemnych przebarwieniach. Powierzchnia z dobrze widocznym odciskiem desek szalunkowych. Ściana ulokowana na piętrze budynku nr 1.



Rys. 10.5. Położenie powierzchni pomiarowych na powierzchni nr 4

Powierzchnia 5

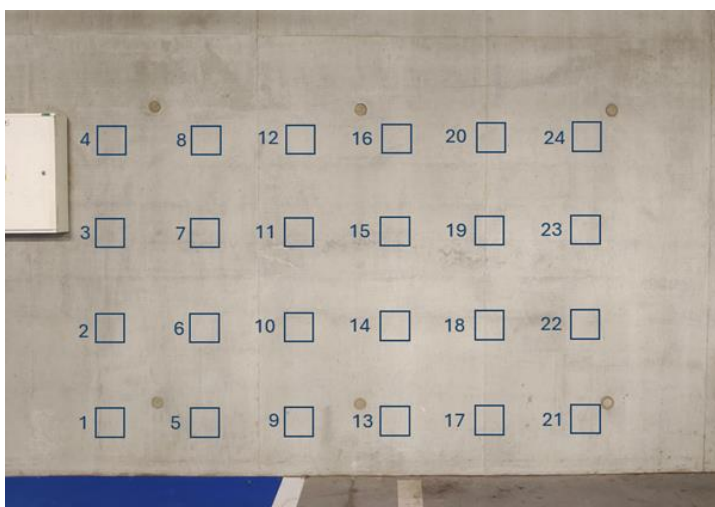
Powierzchnia betonowa o bardzo niskiej porowatości i widocznych przebarwieniach. Powierzchnia gładka. Ściana ulokowana w pn.-wsch. narożniku parkingu podziemnego ulokowanego pod budynkiem nr 2.



Rys. 10.6. Położenie powierzchni pomiarowych na powierzchni nr 5

Powierzchnia 6

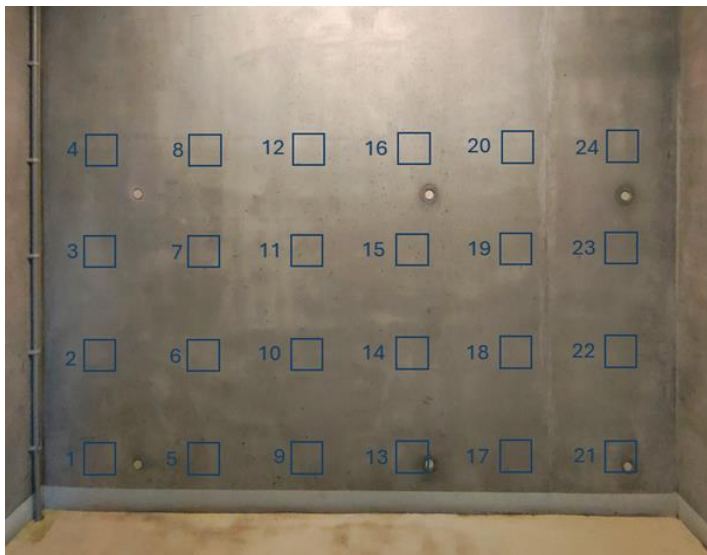
Powierzchnia betonowa o niskiej porowatości i niewielkich przebarwieniach. Powierzchnia gładka. Ściana ulokowana w północno-wschodnim narożniku parkingu podziemnego ulokowanego pod budynkiem nr 2.



Rys. 10.7. Położenie powierzchni pomiarowych na powierzchni nr 6

Powierzchnia 7

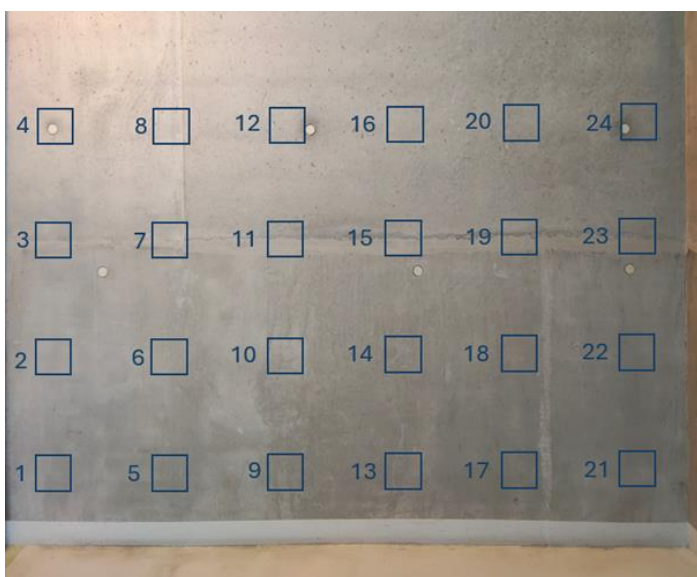
Powierzchnia betonowa o średniej porowatości i jasnych przebarwieniach. Powierzchnia gładka. Ściana ulokowana na półpiętrze klatki schodowej budynku nr 2.



Rys. 10.8. Położenie powierzchni pomiarowych na powierzchni nr 7

Powierzchnia 8

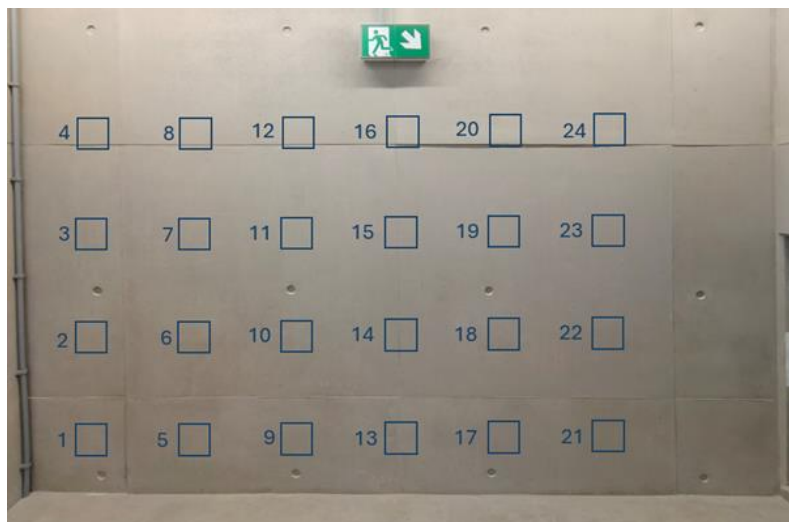
Powierzchnia betonowa o średniej porowatości i przebarwieniach spowodowanych naprawami. Powierzchnia gładka z wyjątkiem miejsca napraw. Ściana ulokowana na półpiętrze klatki schodowej budynku nr 2.



Rys. 10.9. Położenie powierzchni pomiarowych na powierzchni nr 8

Powierzchnia 9

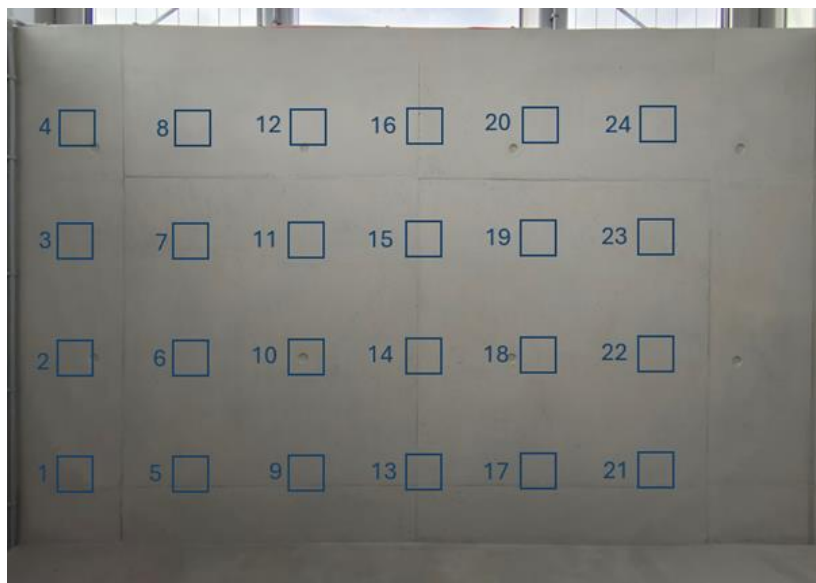
Powierzchnia betonowa o bardzo niskiej porowatości i niewielkich przebarwieniach. Widoczne ślady naprawy powierzchni poprzez nałożenie warstwy rozrzedzonej farby lub zaprawy na powierzchnię ściany skutkujące podwyższoną chropowatością (odpowiadającą w przybliżeniu chropowatości papieru P220). Ściana ulokowana między pierwszym a drugim piętrem zachodniej klatki schodowej ulokowana na półpiętrze klatki schodowej budynku nr 2.



Rys. 10.10. Położenie powierzchni pomiarowych na powierzchni nr 9

Powierzchnia 10

Powierzchnia betonowa o bardzo niskiej porowatości i niewielkich przebarwieniach. Widoczne ślady naprawy powierzchni poprzez nałożenie warstwy rozrzedzonej farby lub zaprawy na powierzchnię ściany skutkujące podwyższoną chropowatością (odpowiadającą w przybliżeniu chropowatości papieru P220) oraz niewielkim połyskiem. Ściana ulokowana na szczycie klatki schodowej budynku nr 2.



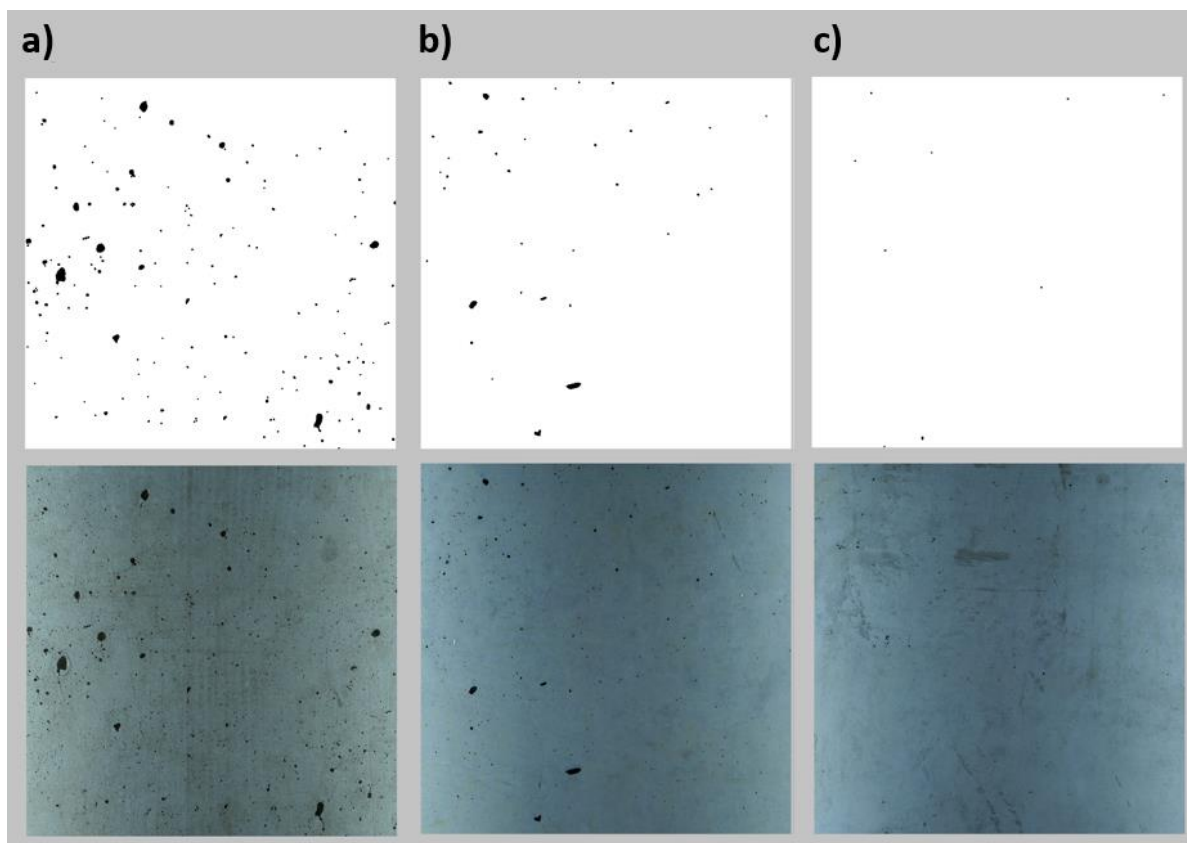
Rys. 10.11. Położenie powierzchni pomiarowych na powierzchni nr 10

10.2. Wyniki badań walidacyjnych - porowatość

10.2.1. Poprawność klasyfikacji porów

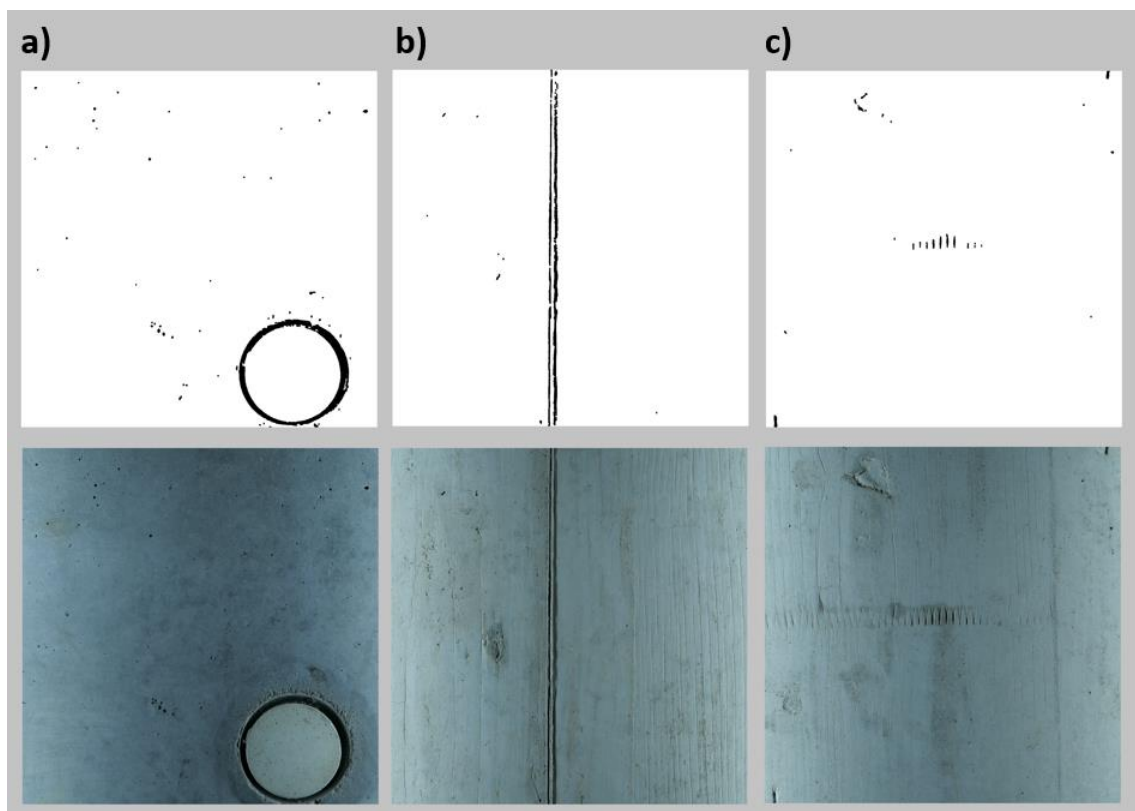
W ramach pierwszego etapu analizy wyników badań walidacyjnych sprawdzono poprawność klasyfikacji porów na wykonanych zdjęciach. W tym celu porównano zdjęcia powierzchni z powstałymi na ich bazie obrazami, otrzymanymi po wykonaniu operacji morfologicznych. Sprawdzono czy algorytm poprawnie klasyfikuje pory widoczne na zdjęciach. Ponadto sprawdzono wpływ przebarwień, łączenia płyt i otworów po ściągach na wynik pomiaru.

Analizując obrazy otrzymane po operacjach morfologicznych, można dojść do wniosku, że wszystkie pory widoczne na zdjęciach są poprawnie klasyfikowane przez algorytm. Ponadto przebarwienia wynikające z miejscowych zmian koloru betonu lub wskutek zabrudzenia zaprawą nie są klasyfikowane jako pory powierzchniowe. Przykładowe powierzchnie z prawidłowo sklasyfikowanymi porami pokazane zostały na Rys. 10.12.



Rys. 10.12. Przykłady powierzchni z prawidłowo sklasyfikowanymi porami - przebarwienia nie zostały zaklasyfikowane jako pory: a) Powierzchnia nr 2 - przebarwienia na powierzchni betonu; b) Powierzchnia nr 6 - zabrudzenia powierzchni; c) Powierzchnia nr 5 - przebarwienia betonu i zabrudzenia powierzchni

W niektórych przypadkach stwierdzono błędy w klasyfikacji porów. Wynikały one głównie z obecności cieni powstałych wskutek czynników innych niż pory powierzchniowe, wśród nich można wymienić otwory po ściągach oraz cienie wynikające z uskoków lub wycieku zaprawy na łączeniach płyt szalunkowych (Rys. 10.13).



Rys. 10.13. Przykłady klasyfikacji cieni powstałych wskutek czynników innych niż pory powierzchniowe: a) Powierzchnia nr 7 - otwór po ściąganiu; b) Powierzchnia nr 4 - wpływ zaprawy na łączeniu płyt szalunkowych; c) Powierzchnia nr 1 - wgłębienie na łączeniu desek stanowiących deskowanie

Biorąc pod uwagę poczynione obserwacje, zdecydowano o wyłączeniu z oceny zdjęć zawierających otwory po ściągach oraz te zawierające łączenia płyt szalunkowych. Wprowadzono także poprawkę do proponowanej procedury badawczej polegającą na wykonywaniu zdjęć powierzchni w taki sposób, aby nie obejmowały one wyżej wymienionych elementów.

10.2.2. Wybór miar porowatości

Kolejnym etapem było porównanie parametrów statystycznych opisujących porowatość powierzchni weryfikowanych wcześniej na etapie badań modelowych. W tym celu, dla każdej badanej powierzchni obliczono porowatość wszystkich branych pod uwagę punktów pomiarowych na podstawie średniej uzyskanej z 7 wykonanych zdjęć dla każdego punktu. Następnie, dla każdej powierzchni obliczono następujące miary porowatości:

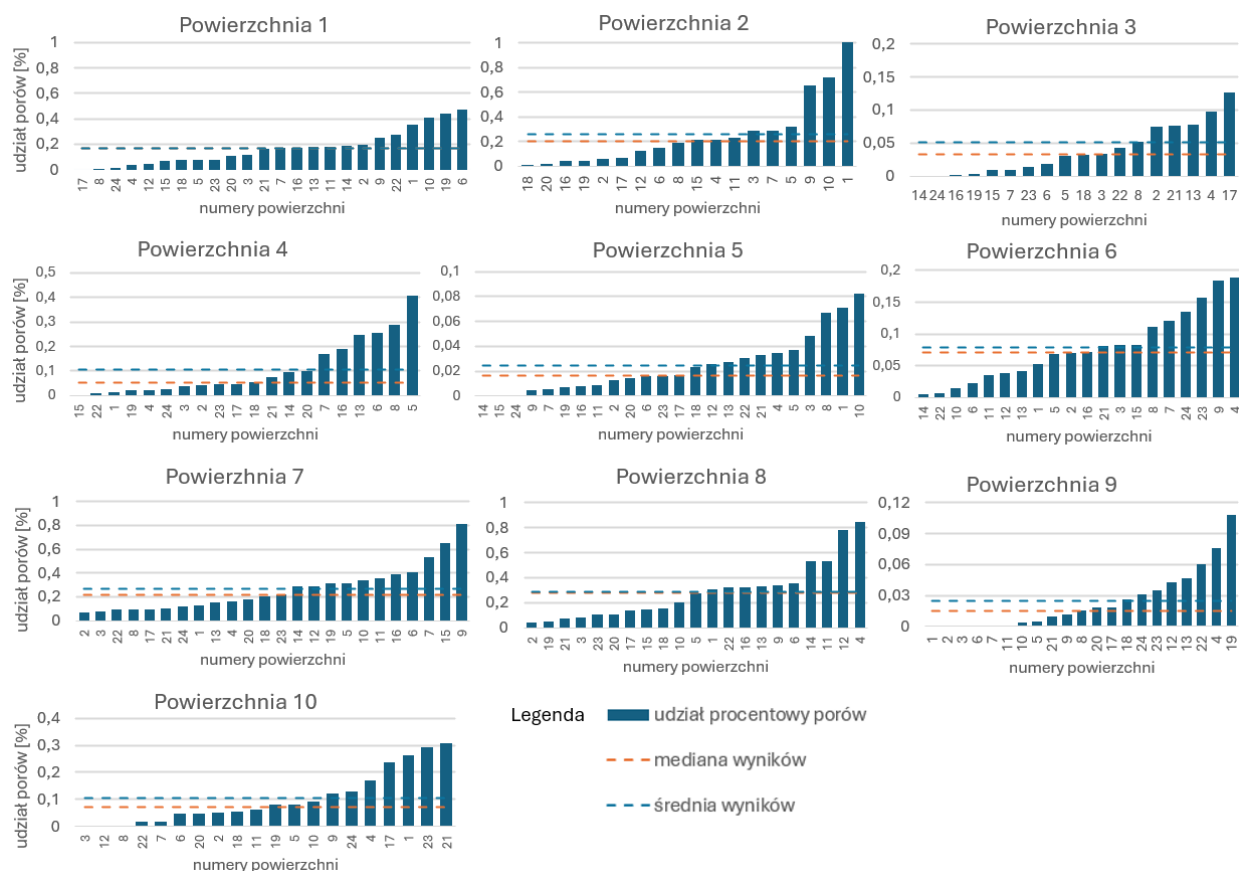
- średnia powierzchnia porów,
- mediana,
- średnia kwadratowa,
- wariancja,

- odchylenie standardowe,
- współczynnik zmienności [%],
- średnia porowatość powyżej 80 percentyla,
- średnia porowatość powyżej 90 percentyla.

Dodatkowo, obliczono parametr skośności, który jest miarą asymetrii rozkładu wartości obliczanej cechy. Wynik skośności powyżej 1 może sugerować znaczną liczbę obserwacji odstających po prawej stronie rozkładu (powierzchnie o ponadnormatywnej porowatości), co może sugerować, że uzyskana wartość średnia może być znacznie zaburzona przez obserwacje odstające. W celu uzupełnienia wyników, podano także dla każdej powierzchni maksymalny oraz minimalny wynik otrzymany spośród wszystkich punktów pomiarowych na danej powierzchni. Wyniki podano w Tab. 10.1. Ponadto, dla każdej powierzchni sprawdzono rozkład wyników na wykresie (Rys. 10.14).

Tab. 10.1. Porowatość poszczególnych powierzchni oceniona na podstawie poszczególnych parametrów statystycznych opisujących porowatość powierzchni

Miara porowatości	Nr powierzchni									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
średnia pow. porów	0,170	0,261	0,051	0,107	0,025	0,072	0,266	0,280	0,024	0,104
mediana	0,168	0,203	0,033	0,051	0,017	0,069	0,214	0,241	0,015	0,071
średnia kwadratowa	0,217	0,381	0,071	0,154	0,033	0,091	0,325	0,355	0,037	0,142
wariancja	0,019	0,081	0,003	0,013	0,001	0,003	0,036	0,050	0,001	0,010
odchylenie standardowe	0,137	0,285	0,051	0,114	0,023	0,058	0,191	0,224	0,029	0,099
współczynnik zmienności	80,651	108,850	100,496	105,871	92,923	80,770	71,911	80,160	119,765	95,348
średnia porowatość powyżej 80 percentyla	0,392	0,694	0,133	0,299	0,061	0,157	0,559	0,610	0,067	0,275
średnia porowatość powyżej 90 percentyla	0,443	0,898	0,154	0,348	0,073	0,177	0,666	0,721	0,082	0,301
skośność	0,885	1,804	1,068	1,337	1,203	0,653	1,377	1,276	1,537	1,002
maksymalny wynik	0,471	1,077	0,176	0,407	0,083	0,189	0,810	0,845	0,108	0,308
minimalny wynik	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,069	0,043	0,000	0,000



Rys. 10.14. Wyniki obliczania udziału procentowego porów uzyskane dla każdej badanej powierzchni (skala wykresów niejednolita)

Analizując wyniki można stwierdzić, że:

- dla wszystkich przebadanych powierzchni parametr skośności był większy od zera co oznacza, że większość wyników miała wartość niższą niż wyliczona średnia. Obserwację tą potwierdza porównanie wartości średniej i mediany,
- obserwacje odstające dotyczyły w głównej mierze punktów o ponadprzeciętnej porowatości, co potwierdza wynik skośności oraz analiza wykresów,
- różnica między średnią a medianą nie była duża, maksymalnie 0,051 punktu procentowego.
- z pozostałych parametrów statystycznych, najłatwiejsze w interpretacji były średnia porowatość powyżej 80 percentyla, średnia porowatość powyżej 90 percentyla oraz maksymalny i minimalny wynik.

Ponadto, analiza wzrokowa wyglądu powierzchni wskazuje, że obszary o najwyższej porowatości nie zawsze zostały uchwycone w obrębie wyznaczonych punktów pomiarowych.

Biorąc powyższe pod uwagę, zdecydowano o wykorzystaniu mediany rozkładu porowatości do opisu ogólnej porowatości powierzchni. Parametr ten jest mniej wrażliwy na obserwacje odstające niż wartość średnia. Postanowiono przyjąć parametr pomocniczy opisujący prawostronne obserwacje odstające, czyli obszary o podwyższonej porowatości. Biorąc pod uwagę, że przy wykorzystaniu punktów pomiarowych rozłożonych zgodnie z zasadami opisanymi na Rys. 10.1, nie ma gwarancji uchwycenia obszarów o najwyższej porowatości, a tym samym mających największy wpływ na estetykę powierzchni, zdecydowano, że pomocniczym parametrem opisującym porowatość będzie udział procentowy powierzchni porów dla pojedynczego punktu pomiarowego o najwyższej porowatości spośród zbioru zasadniczych punktów pomiarowych oraz wyników dodatkowych pomiarów wykonanych w zidentyfikowanych miejscach o podwyższonej porowatości.

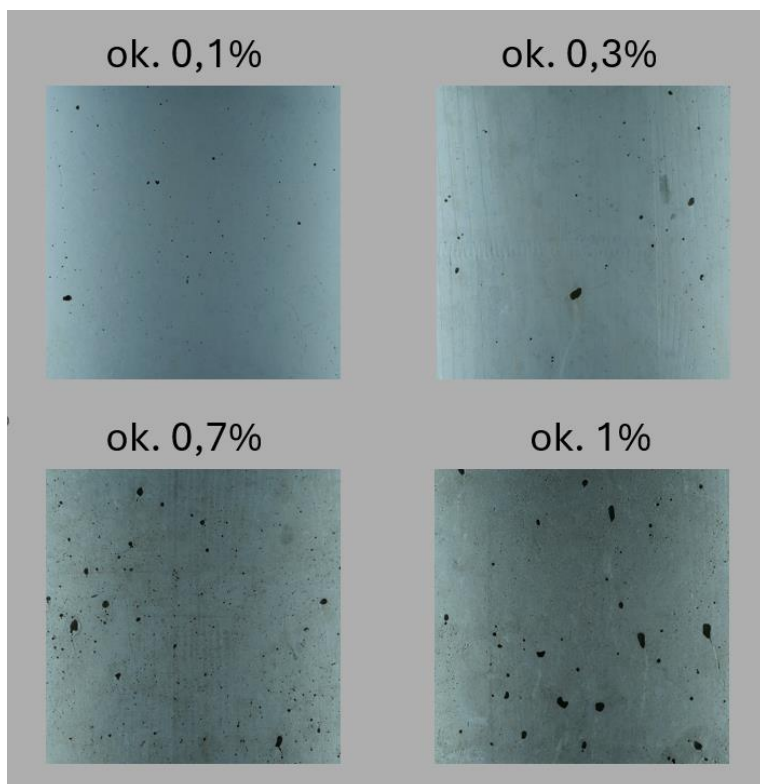
10.2.3. Wybór kryteriów oceny

Ostatnim etapem badań porowatości było wyznaczenie kryteriów oceny powierzchni gładkiego betonu architektonicznego na podstawie przyjętych parametrów statystycznych opisujących porowatość: mediana rozkładu porowatości oraz udział procentowy powierzchni porów dla pojedynczego punktu pomiarowego o najwyższej porowatości.

Aby prawidłowo wyznaczyć kryteria oceny porowatości powierzchni, porównano wyniki otrzymane dla przebadanych powierzchni z ogólnym wrażeniem dla każdej powierzchni (Tab. 10.2). Jako że żadna z analizowanych powierzchni nie dawała wrażenia ściany o podwyższonej porowatości, do porównania dodano osobno część środkową (punkty pomiarowe 9÷16) powierzchni nr 7, która charakteryzowała się największą porowatością w ogólnym wrażeniu. Dla celów porównawczych, na Rys. 10.15 pokazano przykładowe fragmenty powierzchni o różnej porowatości.

Tab. 10.2. Zestawienie wybranych parametrów porowatości powierzchni oraz wyników inspekcji wizualnej

Parametr	Nr powierzchni										
	1	2	3	4	5	6	7	7S	8	9	10
mediana [%]	0,17	0,20	0,03	0,05	0,02	0,07	0,21	0,34	0,24	0,02	0,07
wartość maksymalna [%]	0,47	1,08	0,18	0,41	0,08	0,19	0,81	0,81	0,85	0,11	0,31
różnica wartości maksymalnej i mediany [%]	0,30	0,87	0,14	0,36	0,07	0,12	0,60	0,47	0,60	0,09	0,24
iloraz wartości maksymalnej i mediany	2,81	5,30	5,33	7,93	4,98	2,74	3,79	2,38	3,51	7,13	4,32
ogólne wrażenie	2/B	2/C	1/A	1/B	1/A	1/A	2/B	3/B	2/B	1/A	1/B
Legenda ogólne wrażenie średnia porowatość ściany: 1 - ściana o bardzo niskiej porowatości 2 - ściana o umiarkowanej porowatości 3 - ściana o podwyższonej porowatości Występowanie obszarów o podwyższonej porowatości w stosunku do średniej porowatości: A - ściana bez obszarów o podwyższonej porowatości w stosunku do otoczenia B - ściana z obszarami o podwyższonej porowatości w stosunku do otoczenia C - ściana z obszarami o mocno podwyższonej porowatości w stosunku do otoczenia											



Rys. 10.15. Fotografie fragmentów powierzchni o różnej porowatości powierzchniowej z zaznaczonym udziałem procentowym porów na każdym zdjęciu

Biorąc pod uwagę obserwację, iż wyniki w grupie porowatości A nie były większe niż 0,1%, można przyjąć, że dla najwyższej klasy, graniczną wartością udziału procentowego porów na całej powierzchni wyrażonego za pomocą mediany, może być udział powierzchni porów równy 0,1%. Z kolei najwyższy uzyskany wynik w grupie B przy zastosowaniu mediany wyniósł 0,24%, z kolei dla ściany w grupie C wyniósł 0,34%. Biorąc pod uwagę wyniki dla klasy B i C, postanowiono postawić granicę mediany porowatości dla klasy drugiej na 0,3%. Kolejne klasy postanowiono utworzyć dodając 0,2 punktu procentowego do wartości poprzedniej klasy powierzchni.

Z kolei dopuszczalną wartość maksymalną dla każdej klasy powierzchni ustanowiono jako dwukrotność dopuszczalnej mediany udziału porów dla danej klasy.

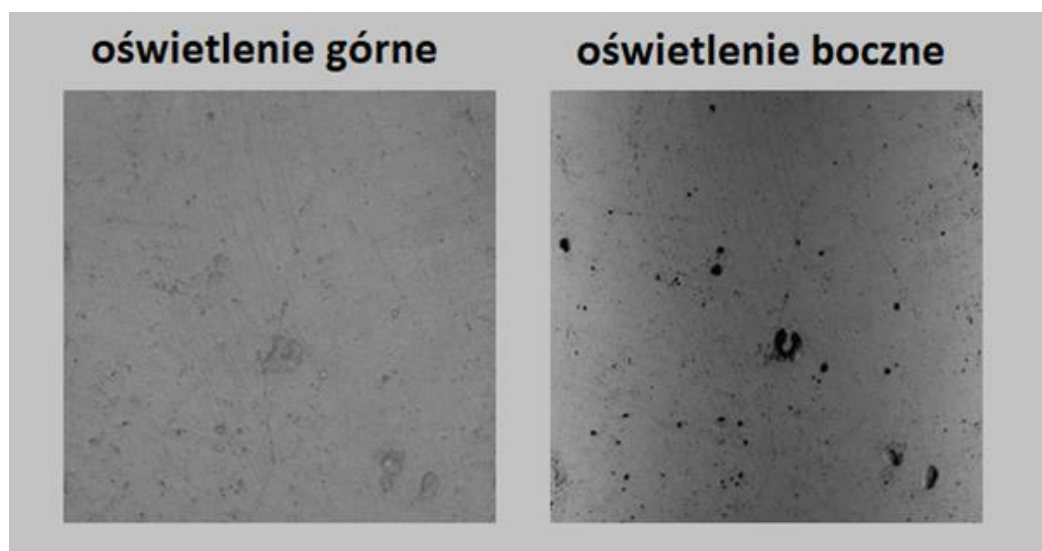
Przyjęte w ten sposób kryteria można porównać z kryteriami oceny znajdującymi się w normach i wytycznych przeanalizowanych w rozdziale 3. (Tab. 3.3). Najczęściej określają one maksymalny dopuszczalny udział powierzchni zajmowanej przez pory dla trzech kolejnych klas jakości odpowiednio jako 0,3 %; 0,6% oraz 0,9% [2, 3, 25]. Odpowiada to w przybliżeniu maksymalnej dopuszczalnej porowatości dla pojedynczego punktu pomiarowego według wytycznych proponowanych przez autora (0,3%; 0,6%, 1,0% w przypadku trzech pierwszych

klas). Należy brać jednak pod uwagę, że omawiane normy i wytyczne [2, 3, 4, 25, 53] określają jedynie maksymalny udział powierzchni zajmowanej przez pory dla pojedynczego pomiaru, nie określając liczby i miejsca wykonywanych pomiarów. Inne jest też pole na jakim wykonywany jest pojedynczy pomiar: w przypadku proponowanej metody jest to 15x15 cm, podczas gdy przeanalizowane normy i wytyczne najczęściej określają pole pomiaru na 50x50 cm [3, 4, 25, 53]. Z wymienionych powodów, jednoznaczne porównanie proponowanych kryteriów oceny z wymogami zawartymi w przeanalizowanych normach i wytycznych nie jest możliwe.

10.3. Wyniki badań walidacyjnych - kolorystyka

10.3.1. Poprawność klasyfikacji koloru

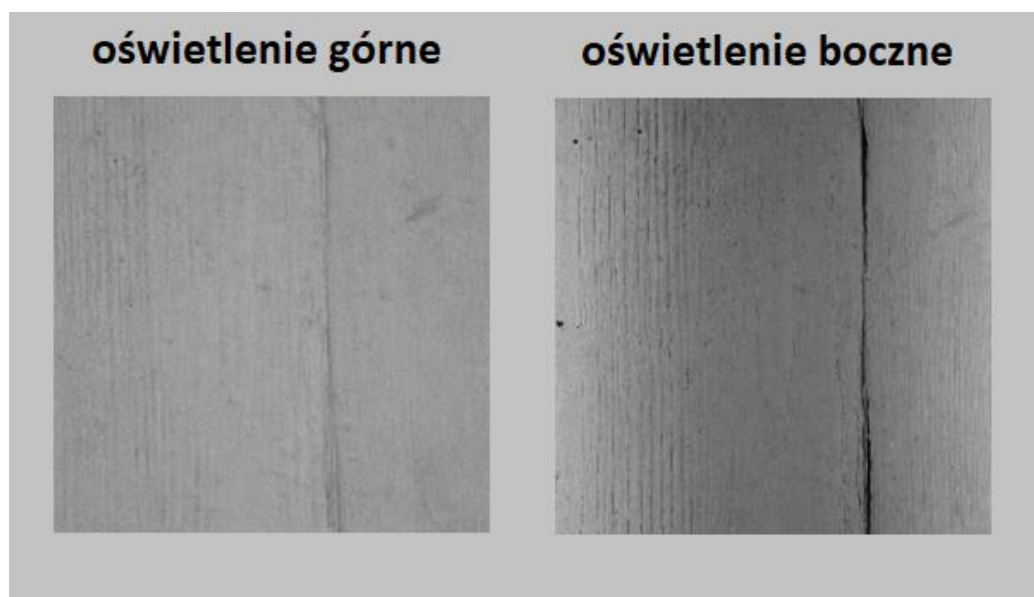
W pierwszym etapie analizy wyników badań walidacyjnych kolorystyki sprawdzono poprawność oświetlenia powierzchni pod kątem pojawienia się obszarów zacienionych, które mogłyby wpłynąć negatywnie na wynik oceny kolorystyki danego fragmentu powierzchni. Szczególną uwagę zwrócono na łączenia płyt i otwory po ściągach. Analiza wykonanych fotografii wykazała, że pory, w szczególności o dużych średnicach, zostały poprawnie oświetlone. Przykładowe wyniki zaprezentowano na Rys. 10.16.



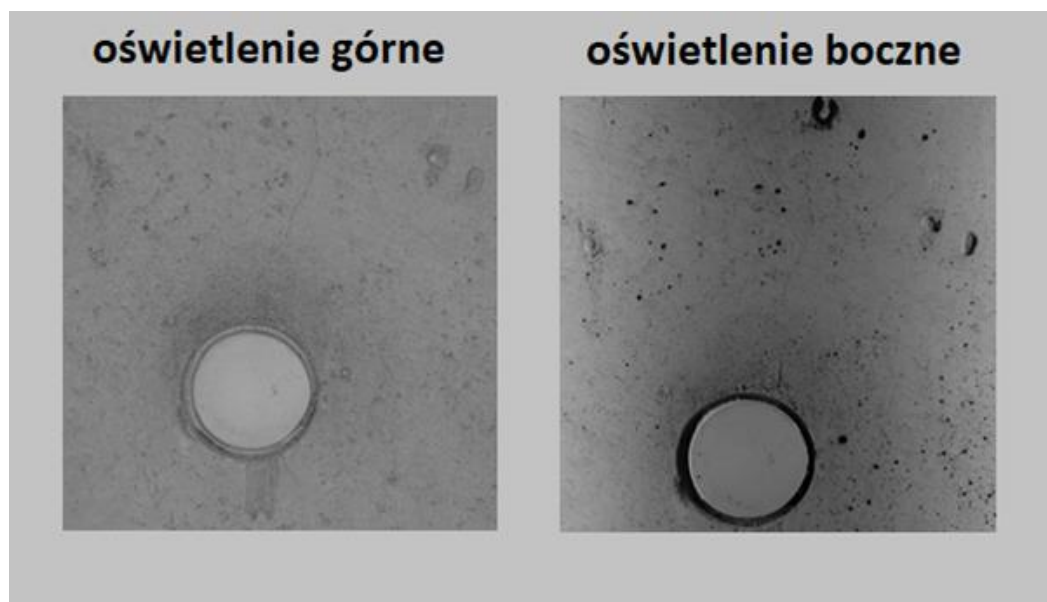
Rys. 10.16. Przykład oświetlenia porowatej powierzchni za pomocą światła górnego używanego do oceny kolorystyki oraz bocznego używanego do oceny porowatości

Sprawdzono także zdjęcia obejmujące łączenia płyt oraz otwory po ściągach. W obu sytuacjach stwierdzono, że powierzchnie są oświetlone w sposób poprawny (Rys. 10.17 i 10.18). Niemniej jednak, ze względu na częste przebarwienia występujące na łączeniach płyt oraz ze względu na

różnice kolorystyczne między zatyczkami otworów a powierzchnią betonu, zdecydowano o wyłączeniu zdjęć zawierających łączenia płyt oraz otwory po ściągach ze zbioru, na podstawie którego w dalszym etapie wyznaczono dominujący kolor powierzchni.



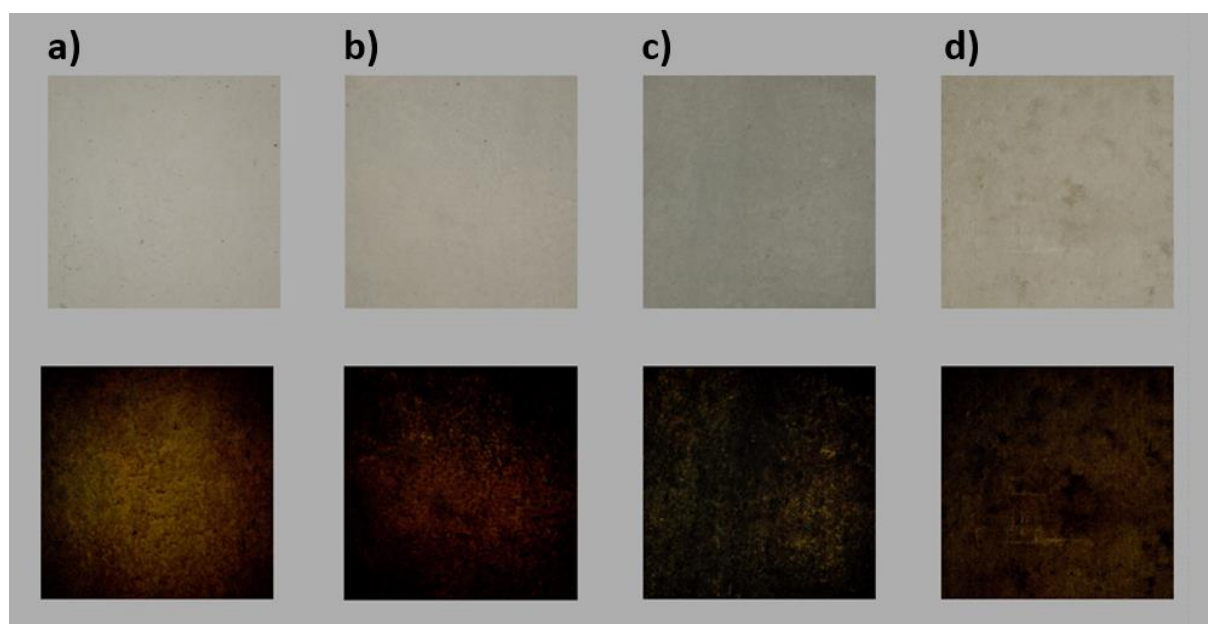
Rys. 10.17. Przykład oświetlenia powierzchni betonowej z widocznym łączeniem płyt za pomocą światła górnego używanego do oceny kolorystyki oraz bocznego używanego do oceny porowatości



Rys. 10.18. Przykład oświetlenia powierzchni betonowej z widocznym otworem po ściągach za pomocą światła górnego używanego do oceny kolorystyki oraz bocznego używanego do oceny porowatości

W kolejnym etapie analizy poprawności oświetlenia powierzchni sprawdzono występowanie na zdjęciach tak zwanego winietowania - sytuacji, kiedy środkowy obszar zdjęcia jest jaśniejszy

od pozostałych obszarów. Zjawisko to może wystąpić dla powierzchni o podwyższonym połysku w sytuacji, kiedy powierzchnia jest oświetlona światłem prostopadłym do powierzchni. W przypadku występowania winietowania nie można porównywać między sobą kolorystyki poszczególnych obszarów tego samego obrazu, gdyż obszar centralny będzie miał wyższą jasność niż obszary położone na jego brzegach. Możliwe jest jednak porównanie między sobą kolorystyki różnych fragmentów większej powierzchni za pomocą porównania między sobą kolorystyki całych zdjęć, na których występuje efekt winietowania o podobnym natężeniu. W celu sprawdzenia efektu winietowania, wykonane zdjęcia poddano obróbce graficznej polegającej na zmniejszeniu jasności obrazu oraz zwiększeniu kontrastu (Rys. 10.19). Ponadto, dla fotografii wszystkich powierzchni porównano średnią jasność (wartość składowej barwy L w modelu CIELAB) środkowego elementu o wymiarach 5x5 cm ze średnią jasnością pozostałej części zdjęcia (Tab. 10.3).



Rys. 10.19. Sprawdzenie efektu winietowania poprzez zmniejszenie jasności i zwiększenie kontrastu zdjęcia. Rząd górny, wykonane fotografie. Rząd dolny - fotografie po zmniejszeniu jasności i zwiększeniu kontrastu: a) Powierzchnia nr 10, punkt pomiarowy 18 - widoczny efekt winietowania; b) Powierzchnia nr 9, punkt pomiarowy 18 - widoczny niewielki efekt winietowania; c) Powierzchnia nr 8, punkt pomiarowy 2 - brak widocznego winietowania; d) Powierzchnia nr 2, punkt pomiarowy 2 - brak widocznego winietowania

Tab. 10.3. Porównanie średniej jasności (parametru L w modelu CIELAB) między środkowym elementem o wymiarach 5x5 cm obrazu o wymiarach 15x15 cm, a pozostałymi fragmentami na brzegach

Obliczany parametr	Nr powierzchni									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
średnia jasność środkowego elementu podzielona przez średnią jasność brzegów	1,018	1,023	1,019	1,025	1,018	1,018	1,019	1,024	1,028	1,031
średnia jasność środkowego elementu minus średnia jasność brzegów	1,291	1,561	1,333	1,763	1,121	1,154	1,123	1,420	1,939	2,193

Analiza obrazów otrzymanych w wyniku zmiany kontrastu i jasności zdjęcia wykazała, że dla zdjęć powierzchni o nr 10 wystąpiło winietowanie obrazu. Analogiczną sytuację zaobserwowano dla powierzchni nr 9, choć efekt ten był mniej wyraźny. Dla pozostałych powierzchni analizowanych tym sposobem nie zaobserwowano wyraźnego winietowania.

Powyższe obserwacje potwierdziła analiza średniej jasności zdjęć. Dla powierzchni 9 i 10 środkowy fragment zdjęć był średnio jaśniejszy o około 2 jednostki. Odnosząc to do danych z Tab. 5.1 oznacza to, że różnica w kolorze była na granicy widoczności dla niewprawionego obserwatora. Dla pozostałych powierzchni środek zdjęć był również jaśniejszy niż pozostałe fragmenty, choć w mniejszym stopniu niż w przypadku powierzchni 9 i 10, a średnia różnica w jasności powinna być do odróżnienia jedynie przez doświadczonego obserwatora.

Przyczyną występowania winietowania w przypadku powierzchni 9 i 10 może być sposób naprawy powierzchni. Obserwacje wykazały, że ich kolor był prawdopodobnie wyrównywany przez nałożenie warstwy rozcieńczonej farby, co mogło wpłynąć na podwyższony połysk.

Aby wyeliminować wpływ winietowania na wyniki pomiaru różnic kolorystycznych, zdecydowano się na pomiar jedynie koloru całych zdjęć 15x15 cm, bez podziału powierzchni na mniejsze fragmenty, które mogłyby różnić się od siebie poziomem jasności.

10.3.2. Sposób oceny dominującego koloru powierzchni

Kolejnym etapem było porównanie parametrów statystycznych opisujących kolorystykę powierzchni w celu wyłonienia tej, która najlepiej opisuje dominujący kolor. Dla każdej badanej powierzchni obliczono średnią kolorystykę wszystkich sfotografowanych punktów pomiarowych, biorąc pod uwagę średni kolor siedmiu zdjęć każdego z punktów pomiarowych. Następnie obliczono następujące parametry statystyczne opisujące kolorystykę całej

powierzchni: średni kolor, mediana oraz średnia bez uwzględniania obserwacji odstających (odrzucono wyniki poniżej 10 i powyżej 90 percentyla). Ze względu na możliwy wpływ winietowania zdecydowano się nie sprawdzać wariantów opartych na kolorystyce pojedynczych składowych części wykonanych fotografii. Następnie obliczono różnicę kolorystyczną $\Delta E(Lab)$ między średnim kolorem powierzchni, a pozostałymi parametrami. Wyniki przedstawiono w Tab. 10.4.

Następnie porównano dla każdej powierzchni wartość składowej koloru L, która w przestrzeni barw CIELAB odpowiada za jasność powierzchni. W Tab. 10.5 przedstawiono różnice w jasności między kolorem otrzymanym na podstawie średniej wartości pomiarów, a kolorami otrzymanymi na podstawie pozostałych parametrów statystycznych. Wynik dodatni oznacza, że obliczony kolor jest jaśniejszy od koloru obliczonego na podstawie średniej.

Tab. 10.4. Podobieństwo kolorystyczne $\Delta E(Lab)$ między średnim kolorem obliczonym na podstawie średniego koloru obrazu 15x15 cm, a kolorem obliczonym na podstawie pozostałych parametrów statystycznych

Sposób wyliczania koloru tła	Nr powierzchni										Wartość średnia	Wartość max
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Mediana	0,23	0,46	0,44	0,23	0,16	0,21	0,13	0,10	0,31	0,54	0,282	0,545
średnia bez obs. ods. (10/90)	0,12	0,21	0,43	0,16	0,07	0,07	0,05	0,37	0,18	0,08	0,173	0,431

Tab. 10.5. Różnica między wielkością składowej L koloru w systemie CIELAB między poszczególnymi parametrami statystycznymi opisującymi kolorystykę powierzchni a średnim kolorem powierzchni obliczonym na podstawie średniego koloru punktów pomiarowych o wymiarach 15x15 cm

Sposób wyliczania koloru tła	Nr powierzchni										Wartość średnia	Wartość max
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
mediana	-0,22	0,46	0,32	0,21	0,02	-0,05	-0,12	0,09	0,28	-0,52	0,047	0,459
średnia bez obs. ods. (10/90)	-0,11	0,19	0,33	-0,15	-0,03	-0,06	-0,04	-0,36	0,16	0,02	-0,005	0,327

Analizując wyniki zawarte w powyższych tabelach można zaobserwować, że dla każdej powierzchni podobieństwo kolorystyczne $\Delta E(Lab)$ między kolorem średnim powierzchni a innymi miarami opisującymi kolorystykę powierzchni było mniejsze niż 1, co oznacza, że wynikowe kolory są nie do odróżnienia nawet dla doświadczonego obserwatora (zgodnie z zestawieniem z Tab. 5.1).

Biorąc pod uwagę wyniki badań modelowych, które wykazały, że mediana jest mniej podatna na obserwacje odstające niż wartość średnia, uznano ten parametr za najlepszy sposób wyznaczania dominującego koloru powierzchni.

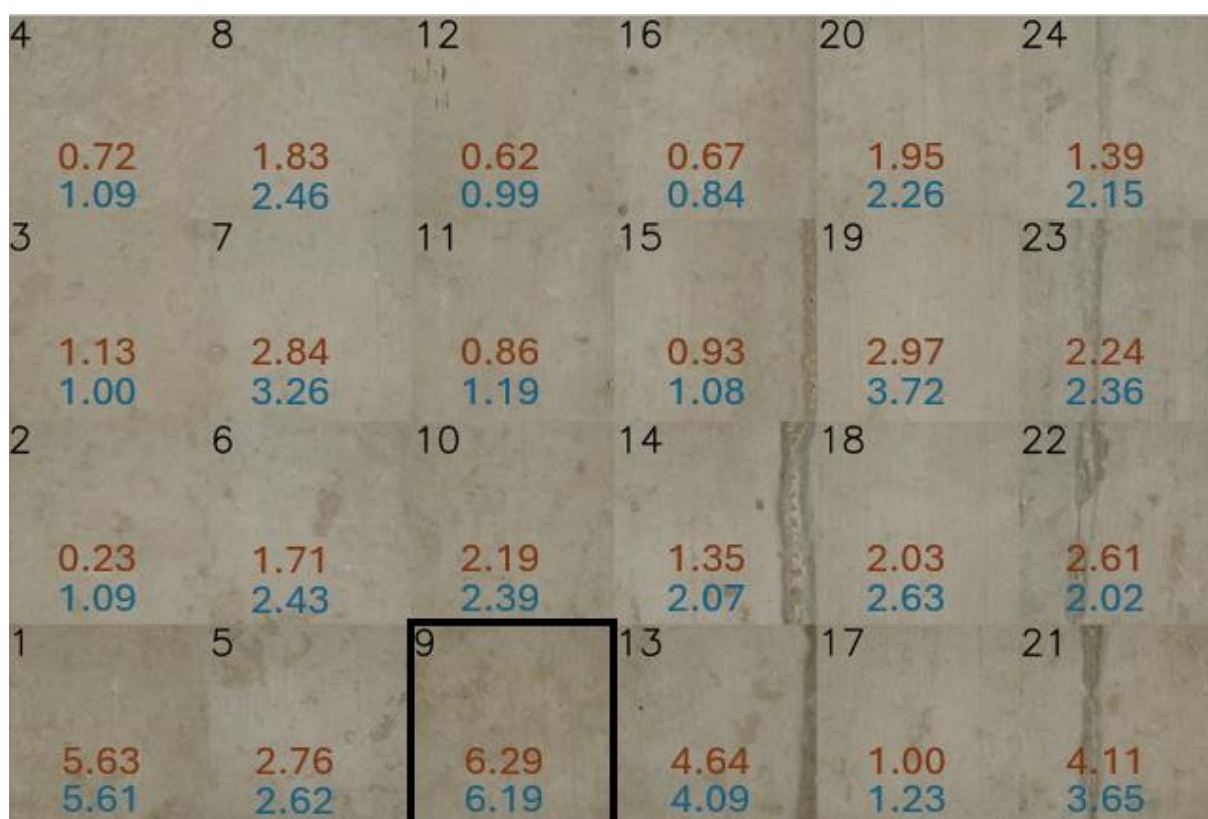
10.3.3. Weryfikacja metody oceny przebarwień

Kolejnym krokiem badań była weryfikacja metody oceny przebarwień powierzchniowych. Proponowana metoda polega na wyznaczeniu na badanej powierzchni miejsc, które mogą stanowić potencjalne przebarwienie, a następnie wykonanie zdjęć, obliczenie kolorystyki zbadanego pola i porównania go z dominującym kolorem powierzchni, uzyskanym na bazie mediany wyników otrzymanych dla całej powierzchni. W związku z tym, sprawdzono medianę oraz średni kolor wszystkich fotografii wykonanych podczas badań walidacyjnych, w tym fotografii obejmujących łączenia płyt, które pominięto przy obliczaniu dominującego koloru powierzchni. W Tab. 10.6 przedstawiono wartości największej uzyskanej różnicy kolorystycznej $\Delta E(Lab)$ między obliczonym kolorem przeanalizowanych zdjęć danej powierzchni a dominującym kolorem tła.

Tab. 10.6 . Wartości największej różnicy kolorystycznej $\Delta E(Lab)$ między obliczonym kolorem przeanalizowanych zdjęć danej powierzchni a dominującym kolorem tła.

Sposób obliczania koloru przebarwienia	Nr powierzchni										Wartość średnia	Wartość max
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
średni kolor fotografii	4,05	6,29	7,28	6,87	2,69	3,76	2,74	3,64	3,76	3,33	4,442	7,281
mediana	4,91	6,19	7,34	6,66	2,52	3,37	3,07	4,12	3,71	3,73	4,562	7,337

Dodatkowo, przeanalizowano dla każdej powierzchni stopień w jakim poszczególne wykonane zdjęcia różniły się od koloru dominującego, zestawiając otrzymane wyniki różnicy kolorystycznej z wykonanymi zdjęciami. Zdjęcia przykładowej powierzchni wraz z naniesionymi wynikami pokazano na Rys. 10.20.



Rys. 10.20. Kolaż zdjęć powierzchni nr 2 z zaznaczonymi numerami punktów pomiarowych oraz uzyskanymi wynikami różnicy kolorystycznej $\Delta E(Lab)$ między obliczonym dominującym kolorem powierzchni a średnim kolorem danej fotografii (kolor pomarańczowy) oraz kolorem danej fotografii obliczonym na bazie mediany (kolor niebieski)

Na podstawie porównania zdjęć z uzyskanymi wynikami można stwierdzić, iż zarówno dla koloru przebarwienia wyliczonego za pomocą średniej, jak i mediany, zastosowany algorytm oceny prawidłowo wskazuje największe przebarwienia powierzchniowe. Wyniki wskazują również, że w przypadku obliczania koloru na bazie mediany przebarwienia lokalne mają mniejszy wpływ na wynik pomiaru niż w przypadku wyliczania koloru przebarwienia za pomocą średniej. Sytuacja ta, dobrze jest widoczna dla punktów pomiarowych nr 13, 21 i 22 na powierzchni nr 2 (Rys. 10.20). Biorąc powyższe pod uwagę, za najlepszą metodę oceny przebarwień powierzchniowych uznano algorytm oceny polegający na obliczaniu różnicy kolorystycznej $\Delta E(Lab)$ między kolorem dominującym powierzchni a kolorem danego obrazu obszaru przebarwienia powierzchniowego obliczonym na bazie mediany.

10.3.4. Wybór kryteriów oceny

Ostatnim etapem badań kolorystyki było wyznaczenie wartości granicznych klas kryteriów oceny powierzchni gładkiego betonu architektonicznego na podstawie przyjętych kryteriów oceny: różnica koloru dominującego powierzchni względem wzorca oraz różnica kolorystyczna $\Delta E(Lab)$ przebarwień powierzchniowych względem koloru dominującego powierzchni.

Aby prawidłowo dobrać wartości graniczne klas dla danych kryteriów oceny, porównano obliczone wartości różnicy kolorystycznej $\Delta E(Lab)$ między dominującym kolorem powierzchni nr 10 a dominującym kolorem pozostałych powierzchni oraz ogólne wrażenie różnicy kolorystycznej (Tab. 10.7). Ponadto, dla celów porównawczych, na Rys. 10.21 pokazano dominujące kolory dla powierzchni 1÷9 wraz z wartością różnicy kolorystycznej między dominującym kolorem danej powierzchni a dominującym kolorem powierzchni nr 10.

Tab. 10.7. Obliczone wartości różnicy kolorystycznej $\Delta E(Lab)$ między dominującym kolorem powierzchni nr 10 a dominującym kolorem pozostałych powierzchni oraz ogólne wrażenie różnicy kolorystycznej

Obliczona cecha	Nr powierzchni									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
różnica dominującego koloru względem koloru powierzchni nr 10	7,51	5,11	2,35	4,71	8,09	7,55	13,19	12,56	0,91	-
ogólne wrażenie - różnica dominującego koloru względem koloru pow. nr 10	B	B	A	A	B	B	C	C	A	-
Legenda ogólne wrażenie: A - niewielkie różnice kolorystyczne B - widoczne różnice kolorystyczne C - znaczące różnice kolorystyczne										

1 7,51	2 5.11	3 2.35
4 4.71	5 8.09	6 7.55
7 13.19	8 12.56	9 0.91

Rys. 10.21. Dominujące kolory dla powierzchni 1 ÷ 9 wraz z wartością różnicy kolorystycznej między dominującym kolorem powierzchni nr 10 a dominującym kolorem pozostałych powierzchni - kolor powierzchni nr 10 w tle

Zestawiając otrzymane wyniki różnic kolorystycznych z ogólnym wrażeniem można wyłonić następujące klasy podobieństwa kolorystycznego:

- Klasa I - $0 \leq \Delta E(Lab) < 5$ - niewielkie różnice kolorystyczne,
- Klasa II - $5 \leq \Delta E(Lab) < 10$ - widoczne różnice kolorystyczne,
- Klasa III - $10 \leq \Delta E(Lab)$ - znaczne różnice kolorystyczne.

Skala ta może być użyteczna zarówno do opisu różnic między kolorami poszczególnych powierzchni jak i do opisu przebarwień na danej powierzchni.

Interesujący jest fakt, iż różnica $\Delta E = 5$, stanowi ekwiwalent różnicy jednego odcienia koloru według raportu technicznego CEN/TR 15739:2008 [27].

11. Procedura badawcza i kryteria oceny

11.1. Procedura oceny porowatości

Badanie porowatości danego elementu polega w pierwszej kolejności na wyznaczeniu podstawowych punktów pomiarowych. Badaną powierzchnię dzieli się na siatkę o wymiarach 50x50 cm. Dla każdego fragmentu powierzchni wyznacza się punkt pomiarowy możliwie blisko jego środka, tak aby na zdjęciu nie znalazły się łączenia płyt szalunkowych oraz otwory po ściągach. Dodatkowe punkty pomiarowe wyznacza się na fragmentach o najwyższej porowatości.

Dla każdego punktu pomiarowego procedura badawcza polega na przyłożeniu urządzenia DARK-BOX do badanej powierzchni. Następnie wykonywanych jest 7 zdjęć w warunkach oświetlenia bocznego z lampami ustawionymi na wysokości 3,5 cm. Zdjęcia przycinane są do wymiaru 15x15 cm, po czym przeprowadzana jest binaryzacja algorytmem Sauvola, operacja erozji za pomocą elementu strukturalnego o średnicy 8 pikseli, usunięcie elementów o wielkości do 10 pikseli oraz dylatacja za pomocą elementu strukturalnego o średnicy 8 pikseli. Ze względu na wyłączenie z analizy porów o średnicy poniżej 1 mm, usuwane są z wynikowego obrazu elementy, których pole jest mniejsze niż pole koła o średnicy 1 mm. Następnie zliczana jest liczba czarnych pikseli z każdego zdjęcia, po czym wyciągana jest średnia liczba pikseli, która kolejno jest przeliczana na procentowy udział powierzchni.

Na bazie wyników uzyskanych z pomiarów podstawowych punktów pomiarowych (bez punktów dodatkowych) wyznacza się medianę udziału procentowego porów opisującą dominujący kolor powierzchni. Dodatkowo oblicza się procentowy udział powierzchni porów dla punktu pomiarowego o najwyższej porowatości. Uzyskane wyniki porównuje się z ustalonymi kryteriami oceny wyznaczając klasę powierzchni ze względu na jej porowatość (Tab. 11.1).

Tab. 11.1. Przyjęte kryteria oceny porowatości powierzchni

Klasa porowatości	Graniczne, maksymalne wartości
I	mediana udziału procentowego porów - 0,1% udział procentowy powierzchni porów dla pojedynczego punktu pomiarowego o najwyższej porowatości - 0,2%
II	mediana udziału procentowego porów - 0,3% udział procentowy powierzchni porów dla pojedynczego punktu pomiarowego o najwyższej porowatości - 0,6%
III	mediana udziału procentowego porów - 0,5% udział procentowy powierzchni porów dla pojedynczego punktu pomiarowego o najwyższej porowatości - 1 %
IV	mediana udziału procentowego porów - 0,7% udział procentowy powierzchni porów dla pojedynczego punktu pomiarowego o najwyższej porowatości – 1,4%

11.2. Procedura oceny kolorystyki

Badanie kolorystyki danego elementu polega w pierwszej kolejności na wyznaczeniu podstawowych punktów pomiarowych – tych samych co w przypadku badania porowatości. Dodatkowe punkty pomiarowe wyznacza się na fragmentach najbardziej odbiegających kolorystycznie od dominującego koloru tła.

Dla każdego punktu pomiarowego procedura badawcza polega na przyłożeniu urządzenia badawczego DARK-BOX do badanej powierzchni. Następnie wykonywanych jest 7 zdjęć w warunkach oświetlenia górnego. Otrzymane zdjęcia są przycinane do wymiaru 15x15 cm. Po tej czynności, następuje kalibracja kolorystyczna zdjęcia poprzez zastosowanie funkcji wielomianowych stopnia trzeciego w przestrzeni kolorystycznej CIELAB. Dla każdego zdjęcia punktów pomiarowych obliczany jest średni kolor zdjęć w przestrzeni CIELAB. Następnie wyznacza się dominujący kolor powierzchni jako medianę wyników otrzymanych dla podstawowych punktów pomiarowych - bez uwzględniania dodatkowych zdjęć zawierających największe przebarwienia. W kolejnym kroku wyznacza się różnicę

kolorystyczną $\Delta E(Lab)$ między dominującym kolorem tła a kolorem przebarwienia obliczanym za pomocą mediany koloru zdjęcia. Następnie otrzymany dominujący kolor tła porównuje się z kolorem powierzchni wzorcowej obliczając różnicę kolorystyczną $\Delta E(Lab)$ między kolorami obu powierzchni. Ostatecznie dany element klasyfikuje się do jednej z klas kolorystyki porównując otrzymane wyniki z granicznymi wartościami dla danych klas (Tab. 11.2).

Tab. 11.2. Przyjęte kryteria oceny kolorystyki powierzchni

Klasa kolorystyki	Graniczne, maksymalne wartości
I	różnica $\Delta E(Lab)$ między dominującym kolorem badanej powierzchni a wzorcem < 5 różnica $\Delta E(Lab)$ między dominującym kolorem badanej powierzchni a kolorem największego przebarwienia < 5
II	różnica $\Delta E(Lab)$ między dominującym kolorem badanej powierzchni a wzorcem < 10 różnica $\Delta E(Lab)$ między dominującym kolorem badanej powierzchni a kolorem największego przebarwienia < 10
III	różnica $\Delta E(Lab)$ między dominującym kolorem badanej powierzchni a wzorcem < 15 różnica $\Delta E(Lab)$ między dominującym kolorem badanej powierzchni a kolorem największego przebarwienia < 15
IV	różnica $\Delta E(Lab)$ między dominującym kolorem badanej powierzchni a wzorcem < 20 różnica $\Delta E(Lab)$ między dominującym kolorem badanej powierzchni a kolorem największego przebarwienia < 20

12. Podsumowanie

12.1. Wnioski

Celem niniejszej pracy było opracowanie ilościowej metody oceny gładkiego betonu architektonicznego możliwej do przeprowadzenia w warunkach budowy. W ramach przeglądu literatury przeanalizowano istniejące normy i wytyczne dotyczące oceny powierzchni betonu architektonicznego. Na tej podstawie wskazano dwie najbardziej istotne cechy powierzchni wpływające na jej końcowy wygląd - porowatość powierzchniową oraz kolorystykę powierzchni.

W celu potwierdzenia postawionej w pracy tezy przeprowadzono badania mające odpowiedzieć na następujące pytania:

- W jakim stopniu przebarwienia i chropowatość wpływają na wynik pomiaru jej porowatości?
- W jakim stopniu porowatość i chropowatość powierzchni wpływają na wynik pomiaru jej kolorystyki?
- Które parametry statystyczne najlepiej charakteryzują porowatość i kolorystykę powierzchni betonu architektonicznego?
- Jakie są optymalne wartości graniczne wybranych parametrów statystycznych dla klasyfikacji powierzchni betonu architektonicznego?

Aby odpowiedzieć na zadane pytania zrealizowano program badawczy, który obejmował badania na próbkach modelowych oraz badania walidacyjne wykonane na ścianach z betonu architektonicznego.

Na podstawie wykonanych badań wyciągnięto następujące wnioski:

- przy ocenie porowatości powierzchni wpływ kolorystyki powierzchni na wynik pomiaru jest pomijalny (maksymalny błąd względny $< 1\%$ dla powierzchni gładkich),
- pomiar porowatości powierzchni dla porów o wielkości od 1 mm można prowadzić dla powierzchni, których chropowatość nie przekracza chropowatości papieru ściernego P120, powyżej tej wartości cienie powstałe na skutek nierówności powierzchni mogą być uznane za pory powierzchniowe,
- porowatość powierzchniowa może mieć wpływ na wynik oceny kolorystyki powierzchni, różnica średniego koloru między powierzchnią porowatą a powierzchnią pozbawioną porów o tym samym kolorze może być na granicy rozróżnialności przez niedoświadczonego obserwatora ($\Delta E(Lab) \cong 2$),

- chropowatość powierzchni może mieć wpływ na wynik oceny kolorystyki, przy chropowatych powierzchniach różnica średniego koloru pomiędzy powierzchnią chropowatą i gładką może być widoczna dla obserwatora ($\Delta E(Lab)$ od ok. 2 do ok. 5). Oddaje to znany z obserwacji przy świetle dziennym fakt, iż powierzchnie chropowate wydają się być ciemniejsze od gładkich z uwagi na cienie wywołane nierównościami powierzchni. Zagadnienie to wymaga dalszych badań w celu znalezienia zależności między wielkością parametrów chropowatości a pozorną zmianą koloru powierzchni.
- parametry, które w sposób najbardziej czytelny opisują porowatość powierzchni to mediana rozkładu porowatości oraz udział procentowy powierzchni porów dla pojedynczego punktu pomiarowego o najwyższej porowatości,
- parametry, które w sposób najbardziej czytelny opisują kolorystykę danej powierzchni to różnica $\Delta E(Lab)$ między dominującym kolorem badanej powierzchni obliczonym na bazie mediany wyników pomiarów a przyjętym wzorcem oraz różnica $\Delta E(Lab)$ między dominującym kolorem badanej powierzchni a kolorem największego przebarwienia,
- do oceny jakości powierzchni zaproponowano graniczne wartości dla poszczególnych klas powierzchni, które zaprezentowano w Tab. 11.1 oraz 11.2.

Wyniki przeprowadzonych badań pozwoliły opracować metodę, którą można wykorzystać do ilościowej oceny powierzchni gładkiego betonu architektonicznego. Należy brać jednak pod uwagę ograniczenia proponowanej metody. Chropowatość powierzchni bez uwzględniania porów nie może być wyższa niż chropowatość papieru ściernego P120. Ponadto musi istnieć możliwość bezpośredniego przyłożenia urządzenia badawczego do badanej powierzchni, co uniemożliwia wykonanie pomiarów na powierzchniach innych niż płaskie (np. okrągłe słupy), oraz może utrudnić pomiar na znacznej wysokości.

Podsumowując, uzyskane wyniki potwierdzają postawioną w pracy tezę, że możliwe jest opracowanie metody jednoczesnego ilościowego pomiaru porowatości i kolorystyki metodami analizy obrazu stwarzając powtarzalne warunki oceny powierzchni gładkiego betonu architektonicznego pomimo niejednorodnych warunków badania.

12.2. Plany na przyszłość

Plany na przyszłość koncentrują się na wyeliminowaniu lub zminimalizowaniu ograniczeń opracowanej metody badawczej. W celu umożliwienia pomiaru powierzchni na znacznej wysokości można zastosować prowadnicę, po której poruszałoby się urządzenie badawcze bądź osadzić urządzenie na wysięgniku.

Ponadto planowane jest wykonanie kolejnych prac nad algorytmem oceny, aby umożliwić pomiar porowatości na powierzchniach o wyższej chropowatości. Pozwoli to na ocenę porowatości powierzchni betonu innego niż gładki, na przykład powierzchni betonów po obróbce powierzchniowej, co odpowiada trendom obecnym wśród młodego pokolenia architektów.

W planach jest także modyfikacja sposobu oświetlania powierzchni, w celu zminimalizowania efektu winietowania przy pomiarze kolorystyki powierzchni.

13. Bibliografia

- [1] ACI 309.2R-15 Guide to Identification and Control of Visible Surface Effects of Consolidation on Formed Concrete Surfaces, American Concrete Institute, USA, 2015.
- [2] ACI 347.3R-13: Guide to Formed Concrete Surfaces, American Concrete Institute, USA, 2013.
- [3] „Sichtbeton. Exposed Concrete“, Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V., Berlin 2004, 2008.
- [4] K. Kuniczuk, Beton architektoniczny. Wytyczne techniczne, Polski Cement, 2011.
- [5] Benedysiuk T., Nowa, ilościowa metoda oceny jakości powierzchni gładkiego betonu architektonicznego, Praca dyplomowa Magisterska na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2016.
- [6] Benedysiuk T., Jackiewicz-Rek W., The application of optical methods for the assessment of the aesthetic compatibility of architectural concrete, MATEC Web of Conferences, EDP Sciences, vol. 322, 2020, Article number: 01034, p. 1-7.
- [7] ACI 303.1-97: Standard Specification for Cast-In Place Architectural Concrete, American Concrete Institute, USA, 1997.
- [8] ACI 303R-12 Guide to Cast-in-Place Architectural Concrete Practice, American Concrete Institute, USA, 2012.
- [9] ACI 301M-05 Specifications for Structural Concrete, American Concrete Institute, USA, 2005.
- [10] ACI 301-16 Specifications for Structural Concrete, American Concrete Institute, USA, 2016.
- [11] Architectural Precast Concrete, 3rd Edition, PCI International, 2007.
- [12] PTV 21-601 Elements Architectoniques et Industriels Prefabriques en Beton Decoratif, Francja, 2001.
- [13] DIN 18217 “Betonflächen und Schalungshaut” (Ausg. 12/1981)
- [14] Jackiewicz-Rek W., Woyciechowski P., Wady betonu architektonicznego w konstrukcji, „Materiały Budowlane” nr 2/2014.
- [15] Silva, C.d.; Coelho, F.; de Brito, J.; Silvestre, J.; Pereira, C. Inspection, diagnosis, and repair system for architectural concrete surfaces. J. Perform. Constr. Facil. 2017.
- [16] Lopez A., Sarli A., Atlas of Architectural Concrete: Coloured Cement Mixtures and their Interaction with Wooden Moulds, ENVIRONMENTAL COLOUR DESIGN: THEORY AND PRACTICE, Collection of Scientific Articles, Smoleńsk, 2018.

- [17] Malara J., Szafraniec J., Critical evaluation of modern concrete applications, MATEC Web of Conferences, EDP Sciences, vol. 219, 2018, Article number: 04010, p. 1-6.
- [18] Kwasny J., Sonebi M., Plasse J., Amziane S., Influence of rheology on the quality of surface finish of cement-based mortars, Constr. Build. Mater., 89, 2015, p. 102-109.
- [19] Lemaire G., Escadeillas G., Ringot E., Evaluating concrete surfaces using an image analysis process, Constr. Build. Mater., 19, 2005, p. 604-611.
- [20] Hoang N., Nguyen Q., A novel approach for automatic detection of concrete surface voids using image texture analysis and history-based adaptive differential evolution optimized support vector machine, Advances in Civil Engineering, 1, 2020, p. 1-15.
- [21] ACI CT-13 ACI Concrete Terminology, American Concrete Institute, USA, 2013.
- [22] PN-B-03264:2002 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone, Polska, 2002.
- [23] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu, Polska, 2008.
- [24] ГОСТ 13015-2012; ИЗДЕЛИЯ БЕТОННЫЕ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА, Rosja, 2012
- [25] ÖNORM B 2211, Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonarbeiten - Werkvertragsnorm, Austria, 2009
- [26] Jackiewicz-Rek W., Kształtowanie jakości gładkiego betonu architektonicznego, Materiały Budowlane, 9, 2015.
- [27] CEN/TR 15739:2008 Precast concrete products — Concrete finishes — Identification, United Kingdom, 2009.
- [28] ISO 4287:1997 - Surface texture: Profile method, Szwajcaria, 1997.
- [29] ISO 25178:2021 Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Areal, Szwajcaria, 2021.
- [30] PN-89/M-04256/04 „Struktura geometryczna powierzchni. Falistość powierzchni. Terminologia".
- [31] Grzelka, M., Majchrowski R., Sadowski Ł., Investigations of concrete surface roughness by means of 3D scanner, Proc Electrotech Inst., 58, 2011.
- [32] ASME B46.1, Surface texture (surface roughness, waviness, and lay), USA, 2009.
- [33] Todhunter L., Leach R., Lawes S., Blateyron F., Industrial survey of ISO surface texture parameters, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 19, 2017, p. 84-92.
- [34] Bissonnette B., Courard L., Garbacz A., Concrete surface engineering, Modern Concrete Technology (18), CRC Press, Taylor and Francis Group, 2016.

- [35] Bermudez Bagniewski A., Incorporation of Aesthetic Performance into Material Selection Support Tools, rozprawa doktorska, University of Tokyo, 2018.
- [36] Muszyński Z., Wyjadłowski M., Assessment of surface parameters of VDW foundation piles using geodetic measurement techniques, *Open Geosciences*, 12(1), 2020, p. 547-567.
- [37] Wyjadłowski M., Muszyński Z., Kujawa P., Application of Laser Scanning to Assess the Roughness of the Diaphragm Wall for the Estimation of Earth Pressure, *Sensors*, 21, 2021.
- [38] Schabowicz K., Wójcicka-Migasiuk D., Urzędowski A., Wróblewski K., Nondestructive investigations of expansion gap concrete roughness, *Measurement*, 182, 2021.
- [39] Sadowski Ł., Czarnecki S., Hoła J., Evaluation of the height 3D roughness parameters of concrete substrate and the adhesion to epoxy resin, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 67, 2015.
- [40] Czarnecki S., Sadowski Ł., Morphological properties of the cement skin: Understanding the effect of contact with formwork, *Case Studies in Construction Materials*, 16, 2022.
- [41] Rosentritt M., Schneider-Feyrer S., Kurzendorfer L., Comparison of surface roughness parameters Ra/Sa and Rz/Sz with different measuring devices, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 150, 2024.
- [42] LST 2015:2020, Surenkamieji betoniniai gaminiai. Paviršiaus išvaizdos charakteristikos ir jų tikrinimo metodai, Litwa, 2020.
- [43] ACI 117-10 (Reapproved 2015) Specification for Tolerances for Concrete Construction and Materials (ACI 117-10) and Commentary (ACI 117R-10), USA, 2015.
- [44] Jackiewicz-Rek W., Betony inne niż wszystkie, *Przegląd budowlany* 2/2020.
- [45] stone and block single use hips plasticformliners, https://apformliner.com/product_category/stone-and-block-single-use-hips-plastic-formliners/, dostęp z dnia 12.03.2023.
- [46] Naganna S., Ibrahim H., Yap S., Tan C., Mo K., El-Shafie A., Insights into the Multifaceted Applications of Architectural Concrete: A State-of-the-Art Review, *Arab. J. Sci. Eng*, 2021, 46, p. 4213-4223.
- [47] Schmitz R.P., Fabric Forms for Architectural Concrete: A State-of-the-Art Report, in AEI, 2015, p. 259-268.
- [48] Hawkins W. et al., Flexible formwork technologies: A state of the art review, *Structural Concrete*, 17, 2016.
- [49] ASTM C979 - 05 Standard Specification for Pigments for Integrally Colored Concrete, USA, 2005.

- [50] PN-EN 197-1:2012 „Cement - Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku, Polska, 2012
- [51] Cassar L., Pepe C., Tognon G., Guerrini G.L., Amadelli R., White Cement for Architectural Concrete Possessing Photocatalytic Properties. In Proceedings of the 11th International Congress on the Chemistry of Cement, Durban, South Africa, 2003.
- [52] Jang H.S., Kang H.-S., So, S.Y., Color expression characteristics and physical properties of colored mortar using groundgranulated blast furnace slag and White Portland Cement, KSCE J. Civ. Eng., 2014, p.1125-1132.
- [53] AFNOR, Normes P18-503, Surfaces et parements de béton - Eléments d'identifications, Francja, 1989.
- [54] BS EN 13670:2009 Execution of concrete structures, Wielka Brytania, 2009
- [55] ДСТУ Б В.2.6-2:2009 ВИРОБИ БЕТОННИ І ЗАЛІЗОБЕТОННИ Загальні технічні умови, Ukraina, 2009.
- [56] CIB Report No.24: Concrete Surface Finishings - Tolerances on Blemishes of Concrete, C.I.B., 1973.
- [57] REFERENCE PANEL GUIDANCE NOTES CONCRETE FINISHES to National Structural Concrete Specification Edition 4, CONSTRUCT, UK, 2017.
- [58] <https://weneve.com/>, dostęp z dnia 01.08.2024
- [59] Kozłowski D., Beton i mistrzowie transmutacji materii, Pretekst, 8, 2018, p. 70-77.
- [60] Malisch W., Brown H., Examination and Evaluation of ACI 347.3R-13 “Guide to Formed Concrete Surfaces”, ACI Foundation, 2017
- [61] Lee B., Kim J, Kim Y., Yi S., A Technique based on Image Processing for Measuring Cracks in the Surface of Concrete Structures, Transactions, SMiRT 19, 2007.
- [62] Liu B., Yang T., Image analysis for detection of bugholes on concrete surface, Constr. Build. Mater., 137, 2017, p. 432-440.
- [63] Yoshitake I., Maeda T., Hieda M., Image analysis for the detection and quantification of concrete bugholes in a tunnel lining, Case Stud. Constr. Mater., 8, 2018, p. 116-130.
- [64] Wei F., Yao G., Yang Y., Sun Y., Instance-level recognition and quantification for concrete surface bughole based on deep learning; Autom Constr.,107, 2019.
- [65] da Silva W., Štemberk P., Expert system applied for classifying self-compacting concrete surface finish; Adv Eng Softw, 64, 2013, p. 47-61.
- [66] Liu Y., Cho S., Spencer B., Fan J., Automated assessment of cracks on concrete surfaces using adaptive digital image processing, Smart Struct Syst., 14, 2014, p. 719-741.

- [67] Urządzenia do pomiaru barwy, <https://www.xrite.com/pl-pl/blog/color-measurement-devices>, dostęp z dnia 01.02.2024.
- [68] Teoria: podstawy kolorymetrii, pomiar barw jednorodnych (solidowych), https://www.eurotom.pl/eurotom_product/jak-dobrac-spektrofotometr-barwy-teoretyczne-podstawy-kolorymetrii-pomiar-barw-jednorodnych-solidowych-zasady-pomiaru-i-urzadzenia/, dostęp z dnia 01.02.2024.
- [69] Zhu Z., Brilakis I., Machine Vision-Based Concrete Surface Quality Assessment, *Journal of Construction Engineering and Management-ASCE*, 136, 2010
- [70] Zhu Z., Brilakis I., Defects Detection & Assessment in Concrete Surfaces, 2008, p. 441-450.
- [71] Francuz P., *Imagia. W kierunku neurokognitywnej teorii obrazu*, 2013, <https://afterimagia.pl/barwa/>, dostęp z dnia 13.05.2022
- [72] Acosta I., Daylight Spectrum Index: Development of a New Metric to Determine the Color Rendering of Light Sources, *International Journal of Engineering and Technology*, 9, 2017, p. 442-447.
- [73] Kelber A., Yovanovich C., Olsson P., Thresholds and noise limitations of colour vision in dim light, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 372(1717), 2017.
- [74] Kim S., Jahandar M., Jeong J., Lim D., Recent Progress in Solar Cell Technology for Low-Light Indoor Applications, *Current Alternative Energy*, 3, 2019.
- [75] Best J. (ed.), *Colour Design Theories and Applications Second Edition*, Elsevier, 2017.
- [76] Kolkur S. et al., Human Skin Detection Using RGB, HSV and YCbCr Color Models, *Proceedings of the International Conference on Communication and Signal Processing 2016 (ICCASP 2016)*, 2017.
- [77] Gamma Vs. Linear Workflow for KeyShot Users, <https://www.willgibbons.com/linear-workflow/>, dostęp z dnia 01.02.2024.
- [78] Molenda J., Wrona M., Siwiec E., Zastosowanie modelu CIE Lab w badaniach barwy lotnych popiołów, *Problemy Eksploatacji*, 3, 2012, p. 177-187.
- [79] Riemersma T., Colour Metric, 2001, <https://www.compuphase.com/cmetric.htm>, dostęp z dnia 10.05.2023.
- [80] Mokrzycki W., Tatol M., Color difference Delta E - A survey, *Machine Graphics and Vision*, 20, 2011, p. 383-411.

- [81] Gonzalez R. C., Woods R. E., Digital Image Processing, Third Edition, Pearson Education, 2008.
- [82] Overview of Image Processing and Analysis,
<https://micro.magnet.fsu.edu/primer/digitalimaging/russ/overview.html>, dostęp z dnia 01.02.2024.
- [83] Sadowski Ł., Mathia T.G., Multi-scale metrology of concrete surface morphology: fundamentals and specificity, *Constr. Build. Mater.*, 113(15), 2016, p. 613-621.
- [84] Stańczyk U., Morfologia Matematyczna - Pojęcia Podstawowe, *Studia Informatica, Politechnika Śląska*, 21(3), 2000.
- [85] Yang X., Shen X., Long J., Chen H., An Improved Median-based Otsu Image Thresholding Algorithm, *AASRI Procedia*, 3, 2012, p. 468-473.
- [86] Chaubey A. K., Comparison of The Local and Global Thresholding Methods in Image Segmentation, *World Journal of Research and Review (WJRR)*, 2(1), January 2016, p. 01-04.
- [87] Niblack W., *An Introduction to Digital Image Processing*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1986, p. 115-116.
- [88] Sauvola J., Seppanen T., Haapakoski S., Pietikainen M., Adaptive document thresholding, *Proc. 4th Int. Conf. on Document Analysis and Recognition*, Ulm, Germany, 1997, p. 147-152.
- [89] Khairun S., Munadi K., Away Y., Arnia F., Improvement of binarization performance using local Otsu thresholding, *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 2018.
- [90] Bernsen J., Dynamic thresholding of grey-level images, *Proc. of the 8th Int. Conf. on Pattern Recognition*, 1986.
- [91] Feng M.-L., Tan Y.-P., Contrast adaptive thresholding of low quality document images, *IEICE Electronics Express*, 1(16), 2004, p. 501-506.
- [92] Singh O. I., Sinam T., James O., Singh T. R., Local contrast and mean based thresholding technique in image binarization, *International Journal of Computer Applications*, 51, 2012, p. 5-10.
- [93] Parker J. R., *Algorithms for Image Processing and Computer Vision*, John Wiley & Sons, 2010.
- [94] Bradley D., Roth G., Adaptive thresholding using the integral image, *Journal of Graphics Tools*, 12(2), 2007, p. 13-21.

- [95] Janowska B., Nowak A., Podstawy Metrologii i Techniki Eksperymentu, Politechnika Wrocławska, 2017.
- [96] B. S. Everitt B., Skrondal A., The Cambridge Dictionary of Statistics, Cambridge University Press, 2010.
- [97] ISO 6344-2:2021, Coated abrasives — Determination and designation of grain size distribution, Szwajcaria, 2021.

Spis Tabel

Tab. 2.1. Zestawienie definicji betonu architektonicznego.....	14
Tab. 2.2. Zestawienie fragmentów wybranych definicji betonu z podziałem na poruszane aspekty.....	16
Tab. 2.3. Parametry amplitudowe struktury geometrycznej powierzchni według normy <i>ISO 4287</i> oraz <i>ISO 25178</i>	25
Tab. 2.4. Porównanie wartości parametru <i>Sa</i> dla gładkich powierzchni betonowych uzyskanych różnymi metodami pomiarowymi	26
Tab. 2.5. Kryteria płaskości powierzchni według raportu technicznego <i>CEN/TR 15739:2008</i> (opracowano na podstawie [27])	28
Tab. 2.6. Rodzaje powierzchni betonu według <i>CEN/TR 15739:2008</i> (opracowano na podstawie [27], tłumaczenie według najlepszej wiedzy autora)	30
Tab. 3.1. Kryteria oceny rozproszonych pustek powietrznych zaproponowane w raporcie <i>CIB No.24</i> (opracowano na podstawie [56])	41
Tab. 3.2. Kryteria oceny pustek powietrznych zawarte w <i>PTV-601 (2001)</i> , (opracowano na podstawie [12]).....	41
Tab. 3.3. Zestawienie kryteriów określających dopuszczalny udział zajmowanej powierzchni przez pory powierzchniowe (opracowano na podstawie [2, 3, 4, 25, 53]).....	42
Tab. 3.4. Zestawienie kryteriów określających dopuszczalną liczbę pustek powietrznych o danym rozmiarze (opracowano na podstawie [42, 55])	43
Tab. 3.5 . Maksymalne dopuszczalne głębokości pustek powietrznych (opracowano na podstawie [27, 42, 53, 55]).....	44
Tab. 3.6. Zestawienie kryteriów dotyczących płaskości elementu jako dopuszczalnego odchylenia od płaszczyzny (opracowano na podstawie [3, 12, 27, 24, 43, 53, 54, 56]).....	45
Tab. 3.7. Zestawienie kryteriów oceny płaskości jako dopuszczalnego przesunięcia płaszczyzn względem siebie (opracowano na podstawie [3, 54, 56])	46
Tab. 3.8. Zestawienie kryteriów dotyczących oceny zarysowania betonów architektonicznych (opracowano na podstawie [24, 54])	47
Tab. 3.9 . Zestawienie wymagań jakościowych dotyczących kolorystyki (opracowano na podstawie [2, 3, 4, 54], tłumaczenie według najlepszej wiedzy autora)	48
Tab. 3.10. Zestawienie kryteriów oceny kolorystyki wykorzystujących wzorniki koloru (opracowano na podstawie [12, 27, 56])	51

Tab. 3.11. Kryteria oceny wad faktury w ujęciu normowym (opracowano na podstawie [2, 3, 4, 25, 42])	52
Tab. 4.1. Zestawienie wybranych cech metod automatycznego zliczania porów (b/d - brak informacji na dany temat)	60
Tab. 4.2. Zestawienie metod oceny kolorystyki.....	65
Tab. 5.1. Interpretacja różnicy kolorystycznej ΔE (CIELAB) (opracowano na podstawie [80])	75
Tab. 8.1. Wyniki klasyfikacji badanych powierzchni	94
Tab. 8.2. Zestawienie przygotowanych powierzchni badawczych - część 1.	105
Tab. 8.3. Zestawienie przygotowanych powierzchni badawczych - część 2.	106
Tab. 8.4. Liczba porów dodana w poszczególnych wariantach	106
Tab. 9.1. Wyniki badań porowatości powierzchni R1 i R2 w zależności od ogniskowej aparatu	108
Tab. 9.2. Zestawienie parametrów użytych wariantów algorytmu obliczania powierzchni porów	109
Tab. 9.3. Precyzja pomiaru udziału procentowego porów wyrażona współczynnikiem zmienności oraz minimalna liczba prób potrzebna do uzyskania założonej dokładności pomiaru przy zastosowaniu różnych wariantów obliczeniowych	111
Tab. 9.4. Zestawienie powierzchni modelowych użytych do oceny dokładności pomiaru porowatości	113
Tab. 9.5. Wyniki analizy dokładności pomiaru udziału procentowego porów przy zastosowaniu algorytmu Sauvola i różnych operacji morfologicznych - wariant z obliczaniem błędu względnego osobno dla każdego wykonanego zdjęcia	114
Tab. 9.6 Wyniki analizy dokładności pomiaru udziału procentowego porów przy zastosowaniu algorytmu Sauvola i różnych operacji morfologicznych - wariant z obliczaniem błędu względnego biorąc pod uwagę średni wynik pomiaru dla każdej powierzchni	115
Tab. 9.7. Zagregowane wyniki pomiaru udziału procentowego porów w postaci maksymalnego błędu względnego dla każdej klasy powierzchni	118
Tab. 9.8. Wpływ chropowatości powierzchni na wyniki pomiarów wyrażony zmianą maksymalnego błędu względnego	120
Tab. 9.9. Poszczególne parametry statystyczne porowatości uzyskane dla symulowanych powierzchni 1 ÷ 6 o różnym rozkładzie porów	125

Tab. 9.10. Zestawienie parametrów testowanych wariantów algorytmu korekcji kolorystycznej	126
Tab. 9.11. Maksymalne średnie wartości odległości między obliczonym kolorem a kolorem teoretycznym wzorników NCS S 0500-N, NCS S 2500-N oraz NCS S 5000-N po korekcji kolorystycznej	127
Tab. 9.12. Dokładność kalibracji kolorystycznej wyrażona jako maksymalny błąd względny różnicy kolorystycznej między poszczególnymi parami wzorników NCS, wariant przy obliczaniu koloru wzornika osobno dla każdego z 7 zdjęć	128
Tab. 9.13. Dokładność kalibracji kolorystycznej wyrażona jako błąd względny średniej różnicy kolorystycznej między poszczególnymi parami wzorników NCS, wariant przy obliczaniu koloru wzornika jako średniej z 7 zdjęć	129
Tab. 9.14. Precyzja pomiaru kolorystyki wyrażona współczynnikiem zmienności oraz minimalna liczba prób potrzebna do uzyskania założonej dokładności pomiaru dla różnych wariantów algorytmu kalibracji kolorystycznej	130
Tab. 9.15. Powierzchnie modelowe użyte do oceny wpływu porowatości na wynik oceny kolorystyki powierzchni	131
Tab. 9.16. Maksymalne uzyskane różnice kolorystyczne między powierzchnią porowatą a powierzchnią gładką o tym samym kolorze	132
Tab. 9.17. Powierzchnie modelowe użyte do oceny wpływu chropowatości na wynik oceny kolorystyki powierzchni	133
Tab. 9.18. Maksymalne różnice kolorystyczne między powierzchnią chropowatą a powierzchnią gładką o tym samym kolorze	135
Tab. 9.19. Różnice kolorystyczne pomiędzy zmierzonym średnim kolorem powierzchni gładkiej (24) a zmierzonymi średnimi kolorami powierzchni chropowatych, na podstawie zdjęcia wykonanego w świetle dziennym bez zastosowanej kalibracji kolorystycznej	136
Tab. 9.20. Podobieństwo kolorystyczne dla wybranych symulowanych powierzchni między wyliczonym kolorem dominującym za pomocą poszczególnych miar, a ustalonym kolorem tła na podstawie średniego koloru zdjęcia powierzchni bez komputerowo zmienionej jasności. Im mniejszy wynik tym podobieństwo większe.	139
Tab. 9.21. Wyniki oceny symulowanych przebarwień na podstawie podobieństwa kolorystycznego $\Delta E(Lab)$ między dominującym kolorem całej powierzchni a wyliczonym kolorem przebarwienia	141

Tab. 10.1. Porowatość poszczególnych powierzchni oceniona na podstawie poszczególnych parametrów statystycznych opisujących porowatość powierzchni	151
Tab. 10.2. Zestawienie wybranych parametrów porowatości powierzchni oraz wyników inspekcji wizualnej	154
Tab. 10.3. Porównanie średniej jasności (parametru L w modelu CIELAB) między środkowym elementem o wymiarach 5x5 cm obrazu o wymiarach 15x15 cm, a pozostałymi fragmentami na brzegach.....	159
Tab. 10.4. Podobieństwo kolorystyczne $\Delta E(Lab)$ między średnim kolorem obliczonym na podstawie średniego koloru obrazu 15x15 cm, a kolorem obliczonym na podstawie pozostałych parametrów statystycznych	160
Tab. 10.5. Różnica między wielkością składowej L koloru w systemie CIELAB między poszczególnymi parametrami statystycznymi opisującymi kolorystykę powierzchni a średnim kolorem powierzchni obliczonym na podstawie średniego koloru punktów pomiarowych o wymiarach 15x15 cm	160
Tab. 10.6 . Wartości największej różnicy kolorystycznej $\Delta E(Lab)$ między obliczonym kolorem przeanalizowanych zdjęć danej powierzchni a dominującym kolorem tła.	161
Tab. 10.7. Obliczone wartości różnicy kolorystycznej $\Delta E(Lab)$ między dominującym kolorem powierzchni nr 10 a dominującym kolorem pozostałych powierzchni oraz ogólne wrażenie różnicy kolorystycznej	163
Tab. 11.1. Przyjęte kryteria oceny porowatości powierzchni	166
Tab. 11.2. Przyjęte kryteria oceny kolorystyki powierzchni.....	167

Spis Rysunków

Rys. 2.1. Efekt światłocienia na przykładzie porów powierzchniowych.....	21
Rys. 2.2. Chropowatość i falistość powierzchni [32].....	24
Rys. 2.3. (a) Płytki wzorcowe ICRI; (b) Parametry amplitudowe poszczególnych płytek wzorcowych (według [34]); Ma (Perez et al.) - średnie arytmetyczne odchylenie profilu - analogicznie do Ra według ISO 4287; Z2 (Maerz et al.) - średnie nachylenie profilu.....	26
Rys. 2.4 . Przykładowe matryce do betonu, źródło: https://apformliner.com	32
Rys. 2.5. Ściana wykonana z zastosowaniem deskowania z tkaniny, źródło: Wilf Meynell/Studio Bark [48].....	33
Rys. 3.1. Przykład elementu referencyjnego według wytycznych ACI 303R-12 [8]	37
Rys. 3.2. Przykładowy panel referencyjny, źródło: cbdg.org.uk	38
Rys. 3.3. Podział powierzchni odniesienia ze względu na wielkość i umiejscowienie (opracowanie własne).....	40
Rys. 3.4. Wzornik porowatości z CIB Report No. 24 [56]	41
Rys. 3.5. Wzornik kolorów według <i>CIB Report No. 24</i> (opracowano na podstawie [56]).....	49
Rys. 3.6. Wzornik koloru powierzchni betonu według brytyjskiego wydania raportu technicznego CEN/TR 15739:2008. Kolumna środkowa zawiera odcienie szarości ponumerowane od 1 do 5, kolumna po lewej zawiera w tym samym wierszu kolory o jeden stopień jaśniejsze, z kolei kolumna po prawej kolory o jeden stopień ciemniejsze w stosunku do kolumny środkowej (opracowano na podstawie [27])	50
Rys. 4.1. Schemat pomiaru pojedynczej pustki według metody prostokątów [60]	57
Rys. 4.2. Przykładowy krzywomierz używany do mierzenia obwodu pustek powietrznych [60]	58
Rys. 4.3. Przykładowy wzornik wielkości otworów [60]	59
Rys. 4.4. Określanie porowatości powierzchni z użyciem wzornika CIB. W tym przypadku powierzchnia została sklasyfikowana do kategorii 7. [56]	59
Rys. 4.5. Poziom jasności L (składowa barwy w systemie CIELAB) poszczególnych obszarów wzornika CIB [19].....	62
Rys. 4.6. Schemat działania kolorymetru w układzie geometrycznym 0/45 [67].....	63
Rys. 4.7. Schemat działania spektrofotometru w układzie geometrycznym 0/45 [67].....	63
Rys. 4.8. Obszar przebarwień na powierzchni betonu zidentyfikowany przy pomocy metody VIRD [69]	64
Rys. 5.1. Zakres czułości poszczególnych czopków w oku ludzkim, źródło: arizona.edu.....	66

Rys. 5.2. Zależność nasycenia barwą żółtą, zieloną, czerwoną i niebieską, a także postrzeganą jasność barw w zależności od długości fali świetlnej [71].....	67
Rys. 5.3. Schemat kombinacji pobudzeń i pól recepcyjnych komórek zwojowych [71]	68
Rys. 5.4. Rozkład spektrum fal dla wybranych standardów określonych przez CIE [72].....	68
Rys. 5.5. Rozkładu spektrum emitowanych fal dla różnych sztucznych źródeł światła [74] ..	69
Rys. 5.6. Wizualizacja barw w przestrzeni RGB (opracowanie własne).....	70
Rys. 5.7. Nieliniowy sposób sumowania barw w modelu sRGB [77].....	71
Rys. 5.8. Wizualizacja barw w przestrzeni YCbCr (opracowanie własne).....	71
Rys. 5.9. Wizualizacja barw w przestrzeni CIELAB (opracowanie własne).....	72
Rys. 6.1. Zależność między przetwarzaniem obrazów cyfrowych (<i>Image Processing</i>) a komputerową analizą obrazu (<i>Image Analysis</i>) [81].....	76
Rys. 6.2. Przykład erozji elementu A przez element S (opracowano na podstawie [84])	77
Rys. 6.3. Przykład dylatacji elementu A przez element S (opracowano na podstawie [84])...	78
Rys. 6.4. Przykład otwarcia elementu A przez element S (opracowano na podstawie [84])...	78
Rys. 6.5. Przykład zamknięcia elementu A przez element S (opracowano na podstawie [84])	79
Rys. 6.6. (a) - Obraz tekstu z nałożonym cieniowaniem sinusoidalnym, (b) - Obraz po zastosowaniu progowania globalnego algorytmem Otsu, (c) - Obraz po zastosowaniu progowania lokalnego [81].....	80
Rys. 7.1. Schemat opisujący kolejne etapy przeprowadzonych badań	84
Rys. 7.2. Zależność między precyzją i dokładnością pomiaru: a) Niska dokładność, niska precyzja; b) Wysoka dokładność, wysoka precyzja; c) Niska dokładność, wysoka precyzja; d) Wysoka dokładność, niska precyzja.....	85
Rys. 8.1. Urządzenie DARK-BOX (a) Wygląd zewnętrzny bez zainstalowanego aparatu, (b) Schemat poglądowy budowy urządzenia badawczego: 1 - aparat rejestrujący obraz, 2 - oświetlenie górne, 3 - badana powierzchnia, 4 - ściany urządzenia pokryte czarną, matową farbą, 5 - oświetlenie boczne.....	88
Rys. 8.2. Schemat proponowanego algorytmu oceny porowatości powierzchni betonu.....	89
Rys. 8.3 . Fotografie badanych powierzchni: a) biała kartka, b) beton niearchitektoniczny, c) Powierzchnia nr 1 - beton z piaskiem wiślanym, d) Powierzchnia nr 2 - beton z białym piaskiem	94
Rys. 8.4. Poszczególne etapy kalibracji kolorystycznej zdjęcia	96
Rys. 8.5. Przymiar kreskowy wykorzystany podczas oceny dystorsji zdjęcia	100

Rys. 8.6. Obrazy powierzchni o wymiarach 5x5 cm przy jednakowym oświetleniu światłem bocznym: a) powierzchnia modelowa pokryta farbą, b) powierzchnia modelowa pokryta papierem P120, c) powierzchnia modelowa pokryta papierem P80, d) powierzchnia modelowa pokryta papierem P40, e) powierzchnia płyty elewacyjnej z betonu architektonicznego, f) - h) powierzchnie betonowe sfotografowane na terenie budynku użyteczności publicznej (zdjęcia autora).....	102
Rys. 8.7. Przykładowe płyty użyte w badaniach - po lewej płyta jasnoszara zawierająca powierzchnie nr 1, 2, 3 i 5; po prawej płyta ciemnoszara zawierająca powierzchnie nr 20, 21, 22 i 24.....	103
Rys. 8.8. Płytki drukowane użyte we wstępnych badaniach porowatości: a) płytka z otworami o średnicy ok 1,05 mm; b) Płytką z otworami o średnicy ok 0,65 mm.....	104
Rys. 8.9. Wzornik koloru Datacolor Spydercheckr użyty do kalibracji kolorystycznej.....	104
Rys. 9.1. Przykłady binaryzacji różnymi algorytmami płytki drukowanej R1, zdjęcie wykonane przy ogniskowej 50 mm, a) Algorytm Local Otsu, b) Algorytm Contrast, c) Algorytm Sauvola	108
Rys. 9.2. Obrazy powierzchni modelowej nr 4 po przekształceniu różnymi wariantami algorytmu binaryzacji. Warianty oparte na algorytmie Sauvola (a ÷ h), warianty oparte na algorytmie Bradley Roth (i ÷ p), Warianty oparte na algorytmie Feng (r ÷ z)	112
Rys. 9.3. Zdjęcie powierzchni modelowej nr 13 z komputerowo dodanymi przebarwieniami (a) oraz bez przebarwień (b)	118
Rys. 9.4. Powierzchnia modelowa nr 16 po operacji binaryzacji algorytmem Sauvola bez dodatkowych operacji morfologicznych. Widoczne otwory o średnicy 4 i 2 mm, brak widoczności porów o średnicy 1 mm.....	122
Rys. 9.5. Wyniki badań symulujących 6 powierzchni o niejednorodnym rozkładzie porów: 1) powierzchnia o równomierne rozłożonych porach, udział procentowy porów równy 0,13%; 2) powierzchnia z nierównomiernym ułożeniem porów, średni udział procentowy porów równy 0,13%; 3) powierzchnia o równomierne rozłożonych porach, udział procentowy porów równy 0,06%; 4) powierzchnia o małej porowatości z obszarem o podwyższonej porowatości zajmującym 1/12 powierzchni; 5) powierzchnia o małej porowatości z obszarem o podwyższonej porowatości zajmującym 1/6 powierzchni; 6) powierzchnia o podwyższonej porowatości z obszarem o zerowej porowatości zajmującym 1/6 powierzchni.....	124

Rys. 9.6. Porównanie zdjęć przed kalibracją (górny rząd), po kalibracji kolorystycznej (środkowy rząd) oraz średnich kolorów zdjęcia po kalibracji (dolny rząd). Numery powierzchni kolejno od lewej: 23, 1, 2, 3, 4	132
Rys. 9.7. Porównanie zdjęć przed obróbką (górny rząd), po kalibracji kolorystycznej (środkowy rząd) oraz średnich kolorów zdjęcia po kalibracji (dolny rząd). Numery powierzchni kolejno od lewej: 23, 17, 18, 19	134
Rys. 9.8. Wybrane powierzchnie modelowe sfotografowane w rozproszonym świetle dziennym	136
Rys. 9.9. Symulowane pomiary sześciu powierzchni. Dla każdej symulowanej powierzchni wykonano 12 pomiarów: 1) powierzchnia równomiernie jasnoszara, 2) powierzchnia równomiernie jasnoszara z jednym ciemnoszarym przebarwieniem zajmującym 1/108 powierzchni, 3) powierzchnia równomiernie jasnoszara z jednym ciemnoszarym przebarwieniem zajmującym 1/36 powierzchni, 4) powierzchnia równomiernie jasnoszara z jednym ciemnoszarym przebarwieniem zajmującym 1/12 powierzchni, 5) powierzchnia równomiernie jasnoszara z jednym ciemnoszarym przebarwieniem zajmującym 1/4 powierzchni, 6) powierzchnia równomiernie jasnoszara z jednym ciemnoszarym przebarwieniem zajmującym 1/6 powierzchni oraz jednym jasnoszarym przebarwieniem zajmującym 1/6 powierzchni	138
Rys. 9.10. Miejsca wykonywania pomiarów przebarwień. Czerwonym kolorem zaznaczone i ponumerowane pola na podstawie których oceniano zidentyfikowane przebarwienia	140
Rys. 10.1. Schemat położenia powierzchni pomiarowych na badanych powierzchniach	142
Rys. 10.2. Położenie powierzchni pomiarowych na powierzchni nr 1	143
Rys. 10.3. Położenie powierzchni pomiarowych na powierzchni nr 2	143
Rys. 10.4. Położenie powierzchni pomiarowych na powierzchni nr 3	144
Rys. 10.5. Położenie powierzchni pomiarowych na powierzchni nr 4	144
Rys. 10.6. Położenie powierzchni pomiarowych na powierzchni nr 5	145
Rys. 10.7. Położenie powierzchni pomiarowych na powierzchni nr 6	145
Rys. 10.8. Położenie powierzchni pomiarowych na powierzchni nr 7	146
Rys. 10.9. Położenie powierzchni pomiarowych na powierzchni nr 8	146
Rys. 10.10. Położenie powierzchni pomiarowych na powierzchni nr 9	147
Rys. 10.11. Położenie powierzchni pomiarowych na powierzchni nr 10	148
Rys. 10.12. Przykłady powierzchni z prawidłowo sklasyfikowanymi porami - przebarwienia nie zostały zaklasyfikowane jako pory: a) Powierzchnia nr 2 - przebarwienia na powierzchni	

betonu; b) Powierzchnia nr 6 - zabrudzenia powierzchni; c) Powierzchnia nr 5 - przebarwienia betonu i zabrudzenia powierzchni	149
Rys. 10.13. Przykłady klasyfikacji cieni powstałych wskutek czynników innych niż pory powierzchniowe: a) Powierzchnia nr 7 - otwór po ściągach; b) Powierzchnia nr 4 - wpływ zaprawy na łączeniu płyt szalunkowych; c) Powierzchnia nr 1 - wgłębienie na łączeniu desek stanowiących deskowanie	150
Rys. 10.14. Wyniki obliczania udziału procentowego porów uzyskane dla każdej badanej powierzchni (skala wykresów niejednolita)	152
Rys. 10.15. Fotografie fragmentów powierzchni o różnej porowatości powierzchniowej z zaznaczonym udziałem procentowym porów na każdym zdjęciu	155
Rys. 10.16. Przykład oświetlenia porowatej powierzchni za pomocą światła górnego używanego do oceny kolorystyki oraz bocznego używanego do oceny porowatości	156
Rys. 10.17. Przykład oświetlenia powierzchni betonowej z widocznym łączeniem płyt za pomocą światła górnego używanego do oceny kolorystyki oraz bocznego używanego do oceny porowatości	157
Rys. 10.18. Przykład oświetlenia powierzchni betonowej z widocznym otworem po ściągach za pomocą światła górnego używanego do oceny kolorystyki oraz bocznego używanego do oceny porowatości	157
Rys. 10.19. Sprawdzenie efektu winietowania poprzez zmniejszenie jasności i zwiększenie kontrastu zdjęcia. Rząd górny, wykonane fotografie. Rząd dolny - fotografie po zmniejszeniu jasności i zwiększeniu kontrastu: a) Powierzchnia nr 10, punkt pomiarowy 18 - widoczny efekt winietowania; b) Powierzchnia nr 9, punkt pomiarowy 18 - widoczny niewielki efekt winietowania; c) Powierzchnia nr 8, punkt pomiarowy 2 - brak widocznego winietowania; d) Powierzchnia nr 2, punkt pomiarowy 2 - brak widocznego winietowania	158
Rys. 10.20. Kolaż zdjęć powierzchni nr 2 z zaznaczonymi numerami punktów pomiarowych oraz uzyskanymi wynikami różnicy kolorystycznej $\Delta E(Lab)$ między obliczonym dominującym kolorem powierzchni a średnim kolorem danej fotografii (kolor pomarańczowy) oraz kolorem danej fotografii obliczonym na bazie mediany (kolor niebieski)	162
Rys. 10.21. Dominujące kolory dla powierzchni 1 ÷ 9 wraz z wartością różnicy kolorystycznej między dominującym kolorem powierzchni nr 10 a dominującym kolorem pozostałych powierzchni - kolor powierzchni nr 10 w tle	164