Załącznik V:
Analiza zjawiska miejskiej wyspy ciepła na terenie gminy miasta Zambrowa



Fundusze Europejskie na Infrastrukturę, Klimat, Środowisko
Rzeczpospolita Polska
Dofinansowane przez Unię Europejską

ZAMAWIAJĄCY

Miasto Zambrów

ul. Fabryczna 3
18-300 Zambrów

WYKONAWCA

Energia dla Miast Sp. z o.o.

os. Kalinowe 17
31-815 Kraków

tel.: 662 239 612
e-mail: biuro@energiadlamiast.pl

OPRACOWANIE

Kamil Krzoski

Anna Owsikowska

Filip Mierzwiński

Dawid Woźnicki

Spis treści

1.1. Sposób badania zjawiska miejskiej wyspy ciepła 6
1.2. Wpływ zjawiska miejskiej wyspy ciepła na zdrowie 7
2. Analiza zjawiska miejskiej wyspy ciepła w Zambrowie 8
2.1. Analiza rozkładu temperatury powierzchniowej (LST) 9
Średnia wieloletnia temperatura powierzchni 11
Temperatura powierzchni w dniu wystąpienia fali upałów 12
Wskaźnik zieleni NDVI 14
Zasięg powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła 15
Intensywność miejskiej wyspy ciepła (wskaźnik UHIER) 17
2.2. Analiza pokrycia terenu, zasobów zieleni i dostępności miejsc chłodu 19
2.3. Terenowe badania termowizyjne 24
2.3.1. Sesja I: park handlowy i jego zaplecze parkingowe 24
2.3.2. Sesja I: osiedla zabudowy wielorodzinnej i parkingi przyblokowe 25
2.3.3. Sesja I: główne ciągi komunikacyjne i skrzyżowania dróg krajowych 29
2.3.4. Sesja I: place utwardzone przy obiektach użyteczności publicznej 33
2.3.5. Sesja I: ulice obrzeży i tereny aktywności gospodarczej 39
2.3.6. Sesja I: parkingi i wnętrza kwartałów zabudowy 41
2.3.7. Sesja I: rozległe place utwardzone i zespoły garaży 43
2.3.8. Sesja II: plac gen. Władysława Sikorskiego i chłodzące oddziaływanie wody 47
2.3.9. Sesja II: ciągi uliczne i pierzeje śródmieścia 51
2.3.10. Sesja II: parkingi i nagrzewanie pojazdów 57
2.3.11. Sesja II: rozległe place utwardzone i jezdnie obrzeży śródmieścia 60
2.3.12. Podsumowanie obserwacji terenowych 64
3. Konkluzja 69
3.1. Wpływ powierzchni antropogenicznych 69
3.2. Identyfikacja obszarów problemowych 70
3.3. Sposoby przeciwdziałania zjawisku miejskiej wyspy ciepła 71
3.4. Rola zieleni i wody jako czynników łagodzących 73

4. Wnioski końcowe i rekomendacja 74

Spis rysunków 78

Spis tabel 81

1. Charakterystyka zjawiska miejskiej wyspy ciepła (MWC)

Miejska wyspa ciepła jest lokalną anomalią termiczną, polegającą na tym, że powietrze zalegające nad obszarem zurbanizowanym pozostaje cieplejsze niż powietrze nad otaczającymi miasto terenami rolnymi, łąkowymi i leśnymi. Przyczyną zjawiska jest zastąpienie naturalnej pokrywy terenu materiałami budowlanymi (betonem, asfaltem, kamieniem, tynkami i pokryciami dachowymi), które cechuje duża pojemność cieplna i niewielka zdolność odbijania promieniowania słonecznego. Energia pochłonięta w porze dziennej jest w nich magazynowana, a następnie stopniowo oddawana do otoczenia, również długo po zachodzie słońca. Proces ten wzmacniają: ubytek powierzchni biologicznie czynnej, zabudowa korytarzy przewietrzania, obniżona wilgotność powietrza w mieście oraz ciepło odpadowe pochodzące z transportu, ogrzewania i chłodzenia budynków oraz działalności gospodarczej.

W klimatologii miasta wyróżnia się dwie zasadnicze formy przestrzenne zjawiska. Przy braku ruchu powietrza kształtuje się wyspa wielokomórkowa, w której poszczególne maksima termiczne pokrywają się z rejonami najintensywniej zabudowanymi. Gdy nad miastem wieje wiatr o prędkości ok. 2–4 m/s, komórki te zlewają się w jedną strukturę o charakterze jednokomórkowym, przesuniętą zgodnie z kierunkiem przepływu. Dalszy wzrost prędkości wiatru, do ok. 7–8 m/s, powoduje tak intensywne wymieszanie powietrza miejskiego z masami napływającymi spoza miasta, że wyspa ciepła zanika. Dla obszaru Zambrowa projekcje klimatyczne wskazują średnią prędkość wiatru na poziomie 2,91 m/s (por. Załącznik 1), a więc wartość mieszczącą się w przedziale sprzyjającym formowaniu wyspy jednokomórkowej. Prędkości rzędu 7–8 m/s, przy których zjawisko zanika, odpowiadają tu wartościom maksymalnym, notowanym sporadycznie: średnia roczna wartość maksymalnej prędkości wiatru na stacji Białystok w latach 1993–2025 wyniosła 9 m/s.

Na powstawanie zjawiska składa się kilka współdziałających czynników:

- **Właściwości radiacyjne materiałów:** nawierzchnie i pokrycia typowe dla przestrzeni zurbanizowanej (asfalt, beton, kostka betonowa, dachówka, papa, blacha, ciemne tynki) pochłaniają zdecydowanie więcej energii słonecznej, niż są w stanie odbić. Efekt potęguje geometria zabudowy: promieniowanie odbite od jednej pierzei trafia na przeciwległą, przez co energia pozostaje uwięziona we wnętrzu ulicy.
- **Ograniczone wypromieniowanie nocne:** rozgrzane powierzchnie sztuczne intensywnie promieniują w zakresie podczerwieni, jednak zwarta zabudowa ogranicza pole widzenia nieba, przez co znaczna część tej energii nie ucieka do atmosfery, lecz jest wielokrotnie odbijana wewnątrz kanionu ulicznego. Skutkiem jest niepełne wychłodzenie miasta w porze nocnej.
- **Niedobór powierzchni biologicznie czynnej:** roślinność reguluje bilans cieplny przez transpirację i parowanie z powierzchni liści, a także zatrzymuje część wód opadowych. Tam, gdzie jej brakuje, energia słoneczna, która w warunkach naturalnych zostałaby zużyta na parowanie, zamienia się w ciepło jawne. W godzinach popołudniowych temperatura powierzchni porośniętych roślinnością pozostaje zbliżona do temperatury terenów pozamiejskich, natomiast elementy zabudowy bywają cieplejsze od otoczenia nawet o ok. 30 °C, a pokrycia z papy lub blachy osiągają temperatury rzędu 80 °C.

- **Rozbudowa powierzchni pionowych:** każda kolejna kondygnacja powiększa powierzchnię wymiany ciepła i jednocześnie hamuje przepływ powietrza. W zwartej zabudowie powstają wąskie kaniony uliczne, w których na dystansie kilku metrów, pomiędzy fragmentem nasłonecznionym a zacienionym, różnica temperatury powierzchni sięga kilkunastu stopni.
- **Ciepło antropogeniczne:** spalanie paliw na cele grzewcze, praca urządzeń klimatyzacyjnych, ruch samochodowy oraz procesy technologiczne stanowią bezpośrednie, dodatkowe źródło ciepła w tkance miejskiej.
- **Lokalny efekt cieplarniany:** podwyższona koncentracja pyłów i gazów cieplarnianych w warstwie powietrza zalegającej nad miastem zwiększa ilość promieniowania długofalowego zwracanego w kierunku powierzchni.

Pierwszy udokumentowany opis zjawiska pochodzi od Luke'a Howarda, który na podstawie wieloletnich obserwacji porównał warunki termiczne Londynu i jego okolic w pracy „The Climate of London deduced from meteorological observations made in the metropolis and at various places around it" (1833 r.). Wraz z postępującym ociepleniem klimatu znaczenie miejskiej wyspy ciepła systematycznie rośnie. W warunkach polskich typowa nocna nadwyżka temperatury powietrza w mieście względem otoczenia mieści się w przedziale 2–4 °C, a przy pogodnej, bezwietrznej pogodzie może przekraczać 8 °C (Kłysik, Fortuniak, 1999). Największe różnice notowane są w bezchmurne noce letnie; w ciągu dnia miasto bywa natomiast chłodniejsze od nagrzanych, pozbawionych zacienienia terenów otwartych.

1.1. Sposób badania zjawiska miejskiej wyspy ciepła

Wiarygodne rozpoznanie miejskiej wyspy ciepła wymaga zestawienia kilku niezależnych źródeł informacji: meteorologicznych, przestrzennych i społecznych. W praktyce planistycznej stosuje się następujące metody:

- **Analiza danych pomiarowych i historycznych:** wieloletnie ciągi obserwacyjne, obejmujące co najmniej 30 lat, pozwalają określić tło klimatyczne obszaru i uchwycić kierunek zmian. Dla Zambrowa jako stację reprezentatywną przyjęto stację synoptyczną IMGW-PIB Białystok o numerze 353230295, będącą najbliższą stacją synoptyczną dysponującą pełną, ciągłą serią pomiarową dla powiatu zambrowskiego, a analizowany okres bazowy obejmuje lata 1993–2025 (por. Załącznik 1 „Wyniki analiz klimatycznych"). Dane stacjonarne uzupełnia się pomiarami mobilnymi lub odczytami z lokalnych sieci czujników, aby uchwycić gradient temperatury pomiędzy centrum a peryferiami miasta.
- **Teledetekcja termalna:** opracowanie termalnych scen satelitarnych misji Landsat 8 i Landsat 9 (sensor TIRS) umożliwia wyznaczenie rozkładu temperatury powierzchni czynnej (LST) dla całego obszaru miasta i wskazanie stref o najsilniejszym nagrzewaniu.
- **Analiza pokrycia terenu i powierzchni uszczelnionych:** rozpoznanie zasięgu powierzchni nieprzepuszczalnych, obejmujących dachy, jezdnie, parkingi i place, pozwala wskazać obszary o największej akumulacji ciepła i najmniejszej zdolności retencyjnej.
- **Mapowanie wrażliwości:** zestawienie zasięgu miejskiej wyspy ciepła z rozmieszczeniem osób starszych i dzieci oraz obiektów szczególnej troski (placówki ochrony zdrowia, domy pomocy społecznej, żłobki, przedszkola, szkoły) wskazuje rejony o najwyższym ryzyku

zdrowotnym, a także pozwala określić dostępność miejsc chłodu w promieniu dojścia pieszego.

- **Badania partycypacyjne:** konsultacje i ankiety z mieszkańcami pozwalają zidentyfikować miejsca odczuwane jako szczególnie uciążliwe w czasie upałów, uzupełniając dane pomiarowe o wymiar percepcji społecznej.
- **Terenowe badania termowizyjne:** pomiary kamerą termowizyjną dostarczają bezpośrednich, punktowych odczytów temperatury poszczególnych materiałów i powierzchni, umożliwiając weryfikację wyników teledetekcji w terenie.

Dopiero łączne zastosowanie wymienionych metod daje obraz zjawiska w pełnym zakresie skal przestrzennych, od poziomu całego miasta po pojedynczą nawierzchnię czy elewację. Takie podejście przyjęto w analizie przedstawionej w rozdziale 2.

1.2. Wpływ zjawiska miejskiej wyspy ciepła na zdrowie

Utrzymująca się w mieście podwyższona temperatura stanowi realne obciążenie fizjologiczne dla mieszkańców. Przegrzanie przestrzeni miejskiej prowadzi do obciążenia cieplnego organizmu, zwiększa ryzyko odwodnienia i udaru cieplnego oraz nasila dolegliwości ze strony układu krążenia i układu oddechowego. Skutki te kumulują się w czasie fal upałów, kiedy noc nie przynosi dostatecznego spadku temperatury, a organizm nie ma warunków do regeneracji. Do najistotniejszych następstw zdrowotnych należą:

- **Zaostrzenia chorób sercowo-naczyniowych i oddechowych:** długotrwałe upały przekładają się na wzrost liczby hospitalizacji oraz podwyższoną śmiertelność z powodu udarów mózgu, zawałów serca, a także zaostrzeń astmy i przewlekłej obturacyjnej choroby płuc.
- **Obciążenie cieplne i udar cieplny:** przegrzanie organizmu objawia się bólem i zawrotami głowy, osłabieniem, dezorientacją, odwodnieniem oraz zaburzeniami gospodarki wodno-elektrolitowej, a w skrajnych przypadkach prowadzi do udaru cieplnego zagrażającego życiu.
- **Zaburzenie nocnej regeneracji:** wysoka temperatura utrzymująca się po zachodzie słońca uniemożliwia organizmowi wypoczynek; szczególnie dotkliwie odczuwają to osoby starsze, przewlekle chore oraz małe dzieci.
- **Pogorszenie jakości powietrza:** wyższym temperaturom towarzyszy intensywniejsze powstawanie ozonu przyziemnego oraz wzrost alergenności pyłku roślin, co dodatkowo obciąża drogi oddechowe.
- **Pogorszenie samopoczucia psychicznego:** przedłużające się okresy gorąca sprzyjają rozdrażnieniu, zaburzeniom snu i obniżeniu ogólnej kondycji psychofizycznej.

Zambrów jest miastem powiatowym w województwie podlaskim, siedzibą powiatu zambrowskiego, o powierzchni 19,02 km^2 i liczbie ludności 20 503 mieszkańców (stan na 31 grudnia 2025 r.), co odpowiada gęstości zaludnienia rzędu 1 080 osób na km^2. Struktura wieku mieszkańców wskazuje na postępujące starzenie się społeczności lokalnej: średni wiek mieszkańca wynosi 43,2 lat, a udział osób w wieku poprodukcyjnym sięga 26,2 % ogółu ludności. Oznacza to, że ponad jedna czwarta mieszkańców należy do grupy o podwyższonej wrażliwości na stres cieplny.

Rozpoznanie zasobów łagodzących przegrzewanie wypada dla Zambrowa niekorzystnie. Lesistość miasta wynosi 1,0 %, a powierzchnia lasów w granicach administracyjnych zaledwie 16,2 ha. Łączna powierzchnia parków spacerowo-wypoczynkowych, zieleńców i terenów zieleni osiedlowej wynosi 33,65 ha, co odpowiada ok. 1,8 % powierzchni miasta; uzupełnia ją 4,49 ha zieleni ulicznej. Rolę zaplecza termicznego pełnią zatem przede wszystkim tereny otwarte i rolne w granicach miasta oraz kompleksy leśne w jego sąsiedztwie, w tym Czerwony Bór na północ od Zambrowa, a w skali wewnątrzmiejskiej dolina Jabłonki wraz z zalewem miejskim, park przy placu gen. Władysława Sikorskiego oraz kompleks zieleni nad zalewem. Szczegółową charakterystykę terenów zieleni i systemu błękitno-zielonej infrastruktury Zambrowa zawiera Załącznik II „Koncepcja zazieleniania miasta Zambrowa", a ich znaczenie dla miejskiej wyspy ciepła omówiono w podrozdziale 2.2.

Grupami najbardziej narażonymi są osoby w wieku podeszłym, dzieci, osoby przewlekle chore oraz mieszkańcy kwartałów o wysokim udziale powierzchni utwardzonych i niskim udziale zieleni wysokiej. W warunkach Zambrowa do rejonów potencjalnie najsilniej obciążonych termicznie należy zaliczyć zwartą zabudowę śródmiejską wraz z ciągami ulicznymi dróg krajowych nr 63 i nr 66, osiedla zabudowy wielorodzinnej wraz z parkingami przyblokowymi, otoczenie placówek oświatowych i opiekuńczych, rozległe place utwardzone przy obiektach handlowych i usługowych oraz tereny aktywności gospodarczej w południowej części miasta. Obszary te powinny być traktowane priorytetowo przy zestawianiu zasięgu zjawiska z rozmieszczeniem grup wrażliwych i obiektów szczególnej troski, zgodnie z metodą mapowania wrażliwości opisaną w podrozdziale 1.1 i wynikami przedstawionymi w podrozdziale 2.2.

Doraźnym narzędziem poprawy komfortu termicznego w przestrzeni publicznej w czasie fal upałów są rozwiązania wodne: fontanny, kurtyny wodne, poidełka i zdroje. Do ich podstawowych funkcji należą:

- **Chłodzenie przez odparowanie:** rozpylana mgiełka wodna oraz otwarta tafla wody obniżają temperaturę odczuwalną w bezpośrednim otoczeniu urządzenia, co ma szczególne znaczenie przy temperaturze powietrza przekraczającej 30 °C.
- **Wychwytywanie zanieczyszczeń:** drobiny wody wiążą pyły zawieszone, co poprawia jakość powietrza w intensywnie użytkowanych fragmentach centrum.
- **Podniesienie wilgotności powietrza:** w dni o niskiej wilgotności względnej rozwiązania wodne nawilżają powietrze w strefie swojego oddziaływania, łagodząc uczucie duszności.

Skuteczność tego typu rozwiązań w warunkach Zambrowa potwierdziły bezpośrednio pomiary terenowe opisane w podrozdziale 2.3, wykonane przy pracującej fontannie na placu gen. Władysława Sikorskiego.

2. Analiza zjawiska miejskiej wyspy ciepła w Zambrowie

Rozdział przedstawia wyniki rozpoznania miejskiej wyspy ciepła na obszarze Zambrowa. Celem analizy było ustalenie przestrzennego zróżnicowania i natężenia zjawiska, wskazanie jego uwarunkowań oraz wyodrębnienie fragmentów miasta najbardziej podatnych na przegrzewanie w sezonie letnim. Uzyskany obraz stanowi podstawę doboru i priorytetyzacji działań adaptacyjnych w ramach Miejskiego Planu Adaptacji do zmian klimatu.

Zambrów położony jest w całości w mezoregionie Wysoczyzna Wysokomazowiecka, w makroregionie Nizina Północnopodlaska. Osią hydrograficzną miasta jest Jabłonka, dopływ Gaci uchodzącej do Narwi; cały obszar należy do dorzecza Wisły. Ukształtowanie terenu jest łagodne, a układ przestrzenny miasta rozciągnięty południkowo, z doliną Jabłonki rozdzielającą część północną, zdominowaną przez osiedla zabudowy wielorodzinnej i śródmieście, od części południowej, w której koncentrują się tereny aktywności gospodarczej oraz zabudowa poprzemysłowa. Główną oś komunikacyjną tworzą przebiegające przez miasto drogi krajowe nr 63 i nr 66, odciążone od zachodu istniejącą obwodnicą w ciągu drogi ekspresowej S8.

Rozpoznanie oparto na trzech wzajemnie uzupełniających się metodach badawczych, których zestawienie pozwala opisać zjawisko w kilku skalach przestrzennych:

- **analiza rozkładu temperatury powierzchni czynnej (LST):** na podstawie czternastu scen satelitarnych misji Landsat 8 i Landsat 9 (sensor TIRS) z lat 2021–2026, przetworzonych w środowisku GIS; metoda ta wskazuje rejony o najwyższym poziomie nagrzewania w skali całego Zambrowa oraz pozwala wyznaczyć zasięg powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła i klasy jej intensywności;
- **analiza pokrycia terenu, zasobów zieleni i dostępności miejsc chłodu:** wykonana na danych satelitarnej mapy pokrycia terenu S2GLC PL oraz rejestrach podmiotów publicznych, z wykorzystaniem inwentaryzacji zieleni przedstawionej w Załączniku II „Koncepcja zazieleniania miasta Zambrowa"; pozwala wyodrębnić strefy o największej akumulacji ciepła i najmniejszej zdolności retencyjnej oraz ocenić dostępność schronienia przed upałem;
- **terenowe badania termowizyjne:** wykonane kamerą termowizyjną w dwóch sesjach, 29 lipca 2026 r. w godzinach popołudniowych oraz 30 lipca 2026 r. w godzinach przedpołudniowych, obejmujące łącznie 31 stanowisk; dostarczają bezpośrednich, punktowych odczytów temperatury konkretnych materiałów i powierzchni oraz umożliwiają weryfikację wyników teledetekcji w wybranych lokalizacjach.

Uwaga terminologiczna. Przedstawione w rozdziale ustalenia dotyczą powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła, opisywanej temperaturą powierzchni czynnej mierzoną teledetekcyjnie oraz temperaturą powierzchni rejestrowaną kamerą termowizyjną. Klasyczna, atmosferyczna miejska wyspa ciepła, zdefiniowana w rozdziale 1 jako nadwyżka temperatury powietrza w mieście względem otoczenia, nie była przedmiotem pomiaru; jej wyznaczenie wymaga sieci czujników temperatury powietrza rozmieszczonych w mieście i poza nim. Obie wielkości są ze sobą powiązane, lecz nie tożsame: powierzchniowa wyspa ciepła osiąga maksimum w godzinach okołopołudniowych i wykazuje znacznie większe amplitudy, natomiast atmosferyczna w godzinach nocnych, przy amplitudach rzędu kilku stopni.

2.1. Analiza rozkładu temperatury powierzchniowej (LST)

Analizę rozkładu temperatury powierzchni terenu oparto na termalnych danych teledetekcyjnych z misji Landsat 8 i Landsat 9 (sensor TIRS), poziom przetworzenia Collection 2 Level-2, produkt Surface Temperature, pozyskanych z platformy EarthExplorer (USGS). Przetwarzanie obrazów do postaci temperatury powierzchni czynnej wykonano z uwzględnieniem korekcji atmosferycznej oraz zróżnicowania emisyjności powierzchni wyznaczonej metodą progów znormalizowanego wskaźnika zieleni NDVI. Szczegółowy przebieg procedury obliczeniowej, od radiancji spektralnej, przez temperaturę radiacyjną i wskaźnik NDVI, po emisyjność i wynikową wartość LST,

odpowiada metodyce określonej w „Poradniku technicznym", stanowiącym załącznik do „Przewodnika dla miast".

Dobór scen satelitarnych oparto na trzech kryteriach. Po pierwsze, analizę ograniczono do miesięcy letnich, w których nagrzewanie powierzchni miejskich osiąga wartości maksymalne, a kontrast termiczny pomiędzy powierzchniami uszczelnionymi a terenami zielonymi jest najwyraźniejszy. Po drugie, wybrano dni o ustabilizowanej pogodzie, w których zachmurzenie w obrębie sceny nie ograniczało odczytu sygnału termicznego z obszaru miasta. Po trzecie, zachowano wieloletnią rozpiętość czasową scen, umożliwiającą wyznaczenie wartości reprezentatywnej minimalizującej wpływ anomalii pogodowych pojedynczych dat. Obliczenia prowadzono na rastrach o rozdzielczości 30 m, w układzie PUWG 1992 (EPSG:2180).

Tabela 1. Zestawienie scen satelitarnych włączonych do analizy temperatury powierzchni czynnej

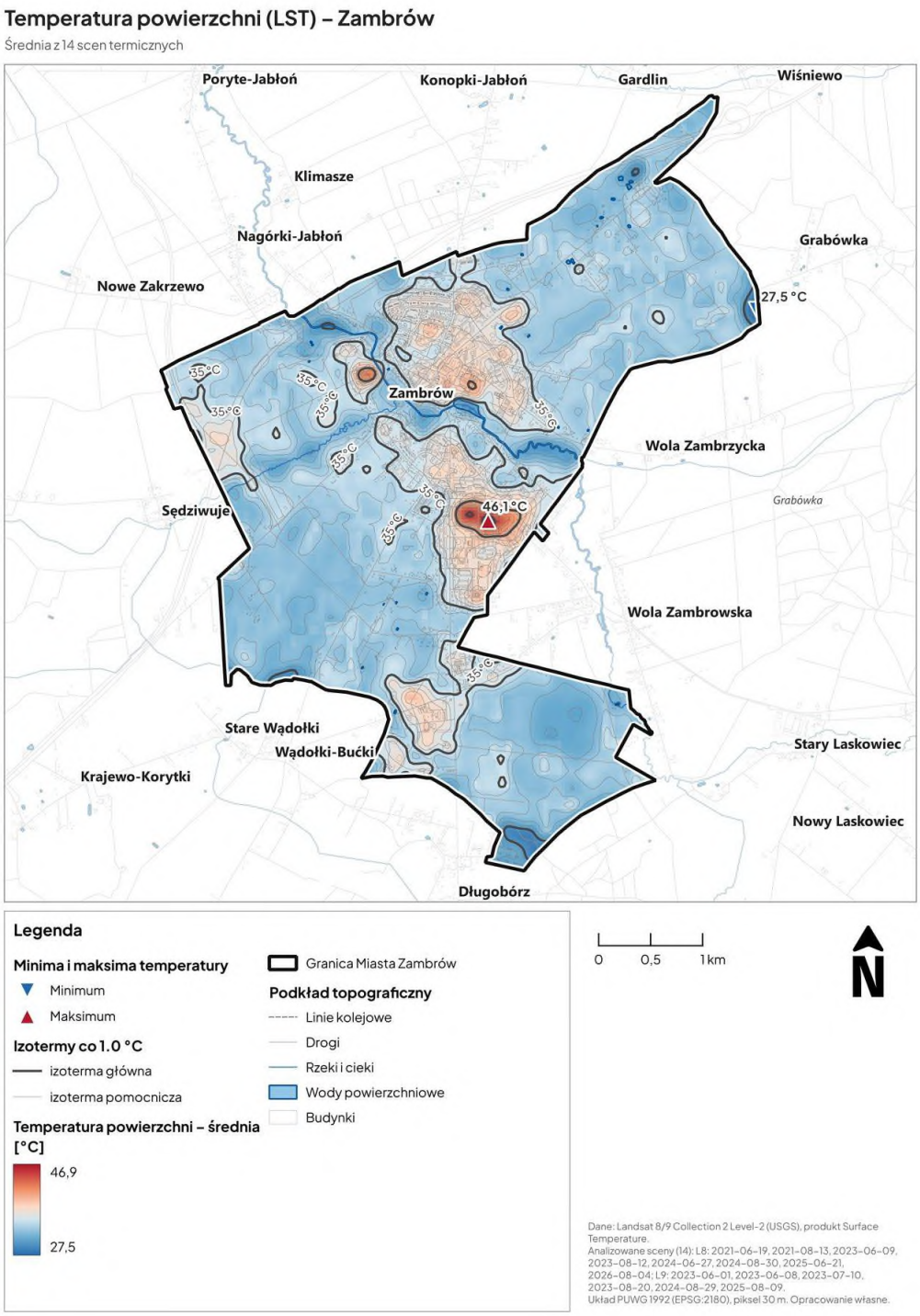
Lp.	Data rejestracji	Misja i sensor	Zakres wykorzystania
1	19 czerwca 2021 r.	Landsat 8 / TIRS	średnia LST, NDVI, SUHI, UHIER
2	13 sierpnia 2021 r.	Landsat 8 / TIRS	średnia LST, NDVI, SUHI, UHIER
3	1 czerwca 2023 r.	Landsat 9 / TIRS	średnia LST, NDVI, SUHI, UHIER
4	8 czerwca 2023 r.	Landsat 9 / TIRS	średnia LST, NDVI, SUHI, UHIER
5	9 czerwca 2023 r.	Landsat 8 / TIRS	średnia LST, NDVI, SUHI, UHIER
6	10 lipca 2023 r.	Landsat 9 / TIRS	średnia LST, NDVI, SUHI, UHIER
7	12 sierpnia 2023 r.	Landsat 8 / TIRS	średnia LST, NDVI, SUHI, UHIER
8	20 sierpnia 2023 r.	Landsat 9 / TIRS	średnia LST, NDVI, SUHI, UHIER
9	27 czerwca 2024 r.	Landsat 8 / TIRS	średnia LST, NDVI, SUHI, UHIER, scena dnia upalnego
10	29 sierpnia 2024 r.	Landsat 9 / TIRS	średnia LST, NDVI, SUHI, UHIER
11	30 sierpnia 2024 r.	Landsat 8 / TIRS	średnia LST, NDVI, SUHI, UHIER
12	21 czerwca 2025 r.	Landsat 8 / TIRS	średnia LST, NDVI, SUHI, UHIER
13	9 sierpnia 2025 r.	Landsat 9 / TIRS	średnia LST, NDVI, SUHI, UHIER
14	4 sierpnia 2026 r.	Landsat 8 / TIRS	średnia LST, NDVI

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych Landsat 8/9 Collection 2 Level-2 (USGS).

Do wyznaczenia średniej wieloletniej temperatury powierzchni oraz średniego wskaźnika NDVI wykorzystano wszystkie czternaście scen. Zasięg powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła oraz klasy jej intensywności wyznaczono na podstawie trzynastu scen z lat 2021–2025.

Średnia wieloletnia temperatura powierzchni

Średnia temperatura powierzchni czynnej wyznaczona dla obszaru miasta i jego otoczenia mieści się w przedziale od 27,5 °C do 46,9 °C. Najwyższą wartość, 46,1 °C, odnotowano w południowej części Zambrowa, w obrębie terenów aktywności gospodarczej i zabudowy poprzemysłowej o dużym udziale powierzchni dachowych i placów manewrowych. Drugie, wyraźnie zaznaczone maksimum obejmuje rdzeń śródmieścia i osiedla zabudowy wielorodzinnej położone na północ od doliny Jabłonki. Najniższe wartości, schodzące do 27,5 °C, występują na terenach otwartych i rolnych we wschodniej oraz południowo-wschodniej części gminy, a także w dolinie Jabłonki i w rejonie zalewu miejskiego. Izoterma 35 °C oddziela strefę zabudowaną od otoczenia w sposób niemal pokrywający się z granicą zwartej tkanki miejskiej.

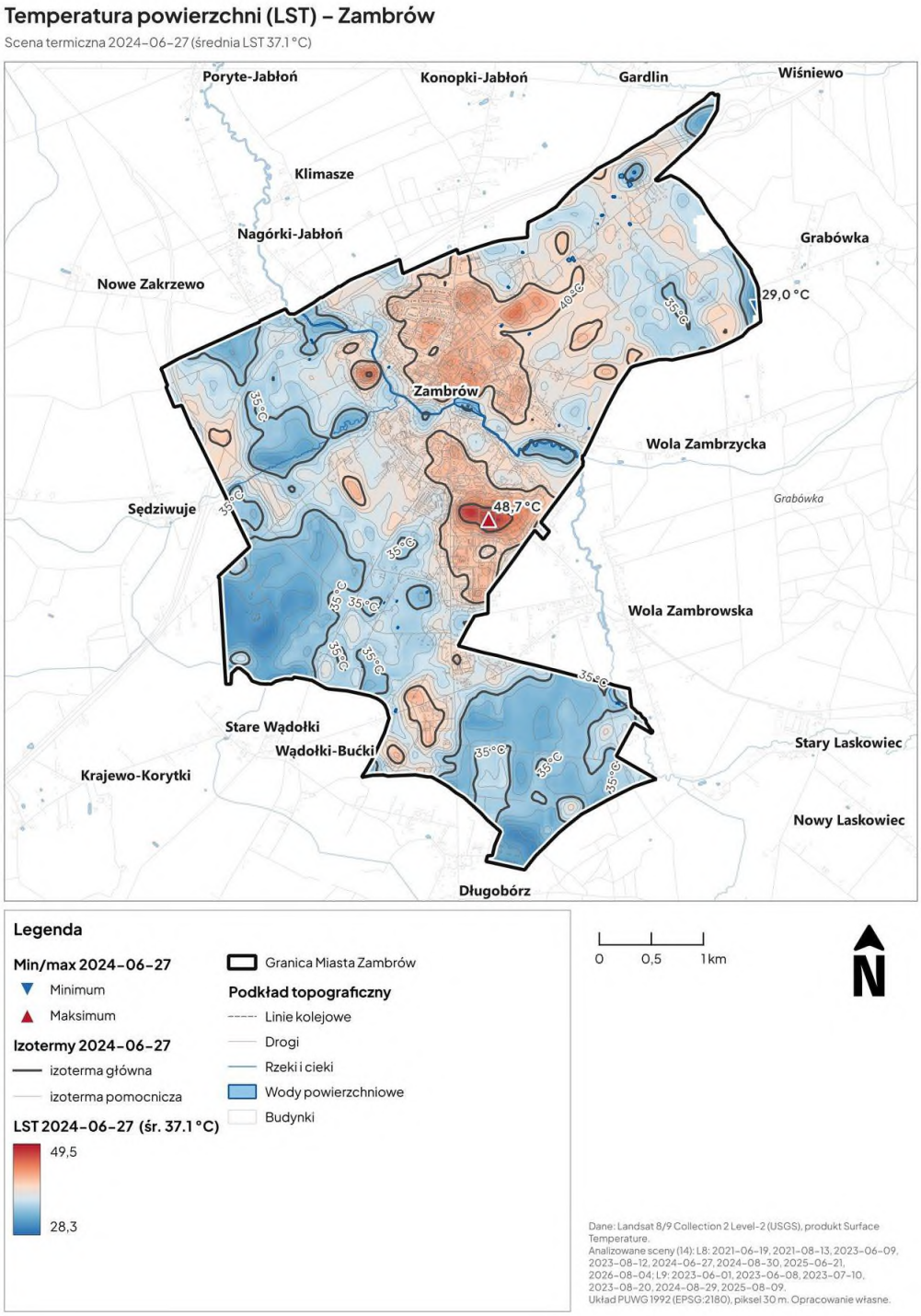


Rysunek 1. Rozkład średniej temperatury powierzchni czynnej na terenie Miasta Zambrów wyznaczony z czternastu scen termicznych

Temperatura powierzchni w dniu wystąpienia fali upałów

Dla zobrazowania warunków panujących w dniu o silnym nagrzaniu powierzchni czynnej wybrano scenę z 27 czerwca 2024 r. Średnia temperatura powierzchni dla obszaru analizy wyniosła w tym dniu 37,1 °C, przy rozpiętości od 28,3 °C do 49,5 °C. Maksimum, 48,7 °C, wystąpiło w tym samym rejonie co na mapie średniej wieloletniej, to jest na terenach aktywności gospodarczej w południowej części miasta, natomiast minimum, 29,0 °C, na terenach rolnych na

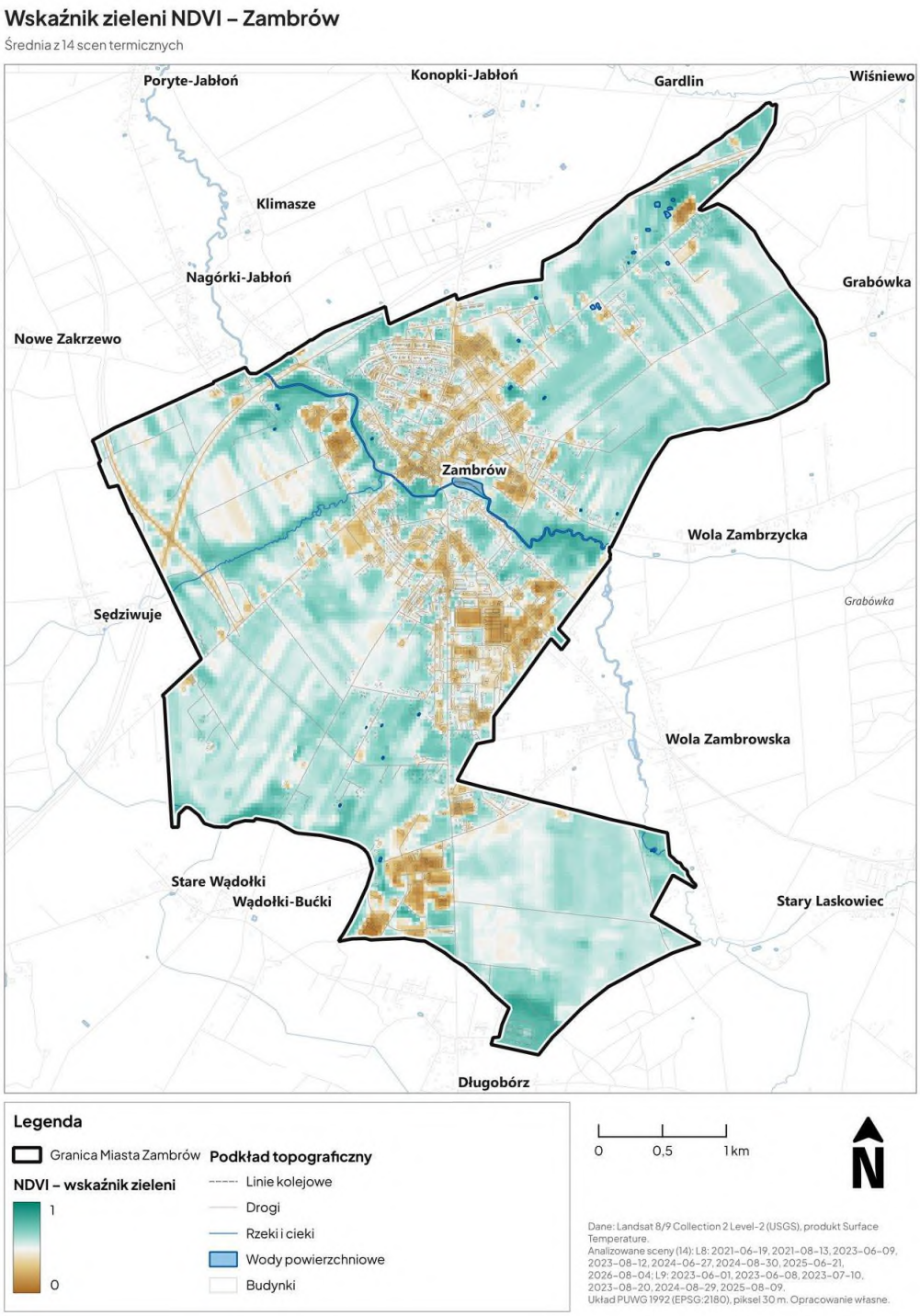
północny wschód od granicy administracyjnej. W dniu upalnym pole podwyższonej temperatury rozlewa się poza rdzeń zabudowy i obejmuje także ciągi komunikacyjne oraz rozproszone zespoły zabudowy jednorodzinnej, co oznacza, że w warunkach fali upałów obciążeniem termicznym objęta jest praktycznie cała tkanka miejska.



Rysunek 2. Rozkład temperatury powierzchni czynnej na terenie Miasta Zambrów w dniu 27 czerwca 2024 r.

Wskaźnik zieleni NDVI

Rozkład znormalizowanego wskaźnika zieleni NDVI, wykorzystanego przy wyznaczaniu emisyjności powierzchni, stanowi zarazem czytelny obraz przestrzennego zróżnicowania kondycji i zasobności zieleni. Najniższe wartości wskaźnika tworzą zwarte pola pokrywające się z rdzeniem śródmieścia, z zespołem zabudowy wielorodzinnej w części północnej oraz z terenami aktywności gospodarczej i zabudowy poprzemysłowej w części południowej. Najwyższe wartości obejmują tereny rolne i łąkowe otaczające miasto, dolinę Jabłonki oraz kompleksy zadrzewień na obrzeżach. Zestawienie tego rozkładu z mapą temperatury powierzchni pokazuje odwrotną zależność obu wielkości: pola o najniższym NDVI pokrywają się z polami o najwyższej temperaturze powierzchni czynnej.

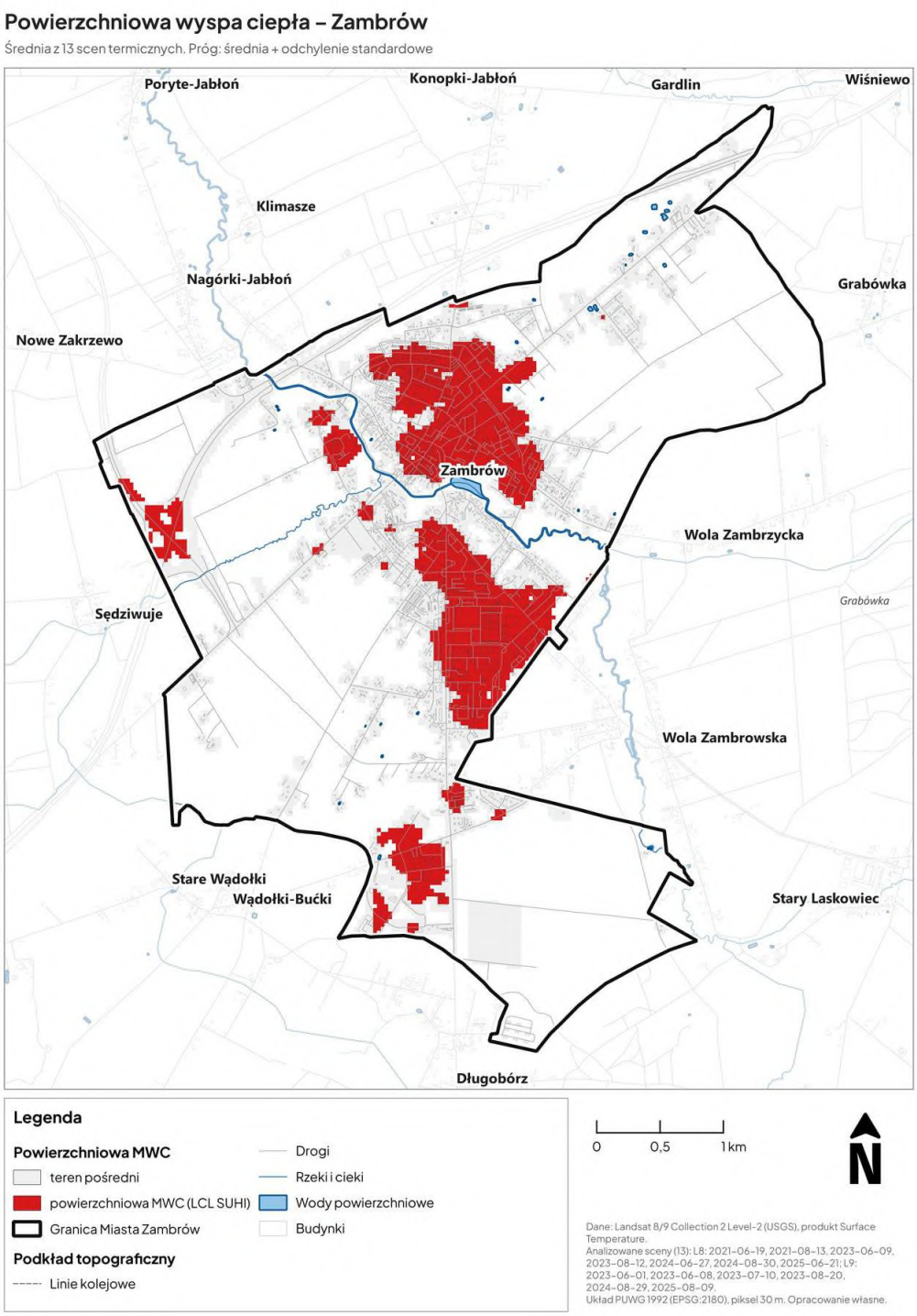


Rysunek 3. Rozkład wskaźnika zieleni NDVI na terenie Miasta Zambrów wyznaczony z czternastu scen termicznych

Zasięg powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła

Zasięg powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła wyznaczono zgodnie z metodyką „Przewodnika dla miast", przyjmując za jej granicę te fragmenty obszaru analizy, w których średnia temperatura powierzchni z trzynastu scen przekracza sumę wartości średniej i jednego odchylenia standardowego, po ograniczeniu wyniku do terenów antropogenicznych. Obszary o temperaturze niższej od tego progu, lecz nieosiągające kryterium wyspy chłodu, przedstawiono na mapie jako teren pośredni.

Rozkład zjawiska w Zambrowie jest wyraźnie dwudzielny i ściśle podporządkowany układowi zabudowy. Pierwsze, największe pole obejmuje zwarty zespół osiedli zabudowy wielorodzinnej i śródmieścia na północ od doliny Jabłonki. Drugie, niewiele mniejsze, rozciąga się na południe od rzeki i obejmuje tereny aktywności gospodarczej wraz z zabudową poprzemysłową oraz przyległymi placami i parkingami. Mniejsze, izolowane pola występują w rejonie zabudowy przy południowej granicy miasta oraz w zachodniej enklawie zabudowy usługowej przy obwodnicy. Poza zasięgiem zjawiska pozostają dolina Jabłonki wraz z zalewem miejskim, tereny rolne i otwarte we wschodniej i południowo-wschodniej części gminy oraz pas zabudowy rozproszonej w części północno-wschodniej. To one tworzą chłodne tło termiczne przyjęte jako wartość referencyjna i stanowią zaplecze przewietrzające miasto.



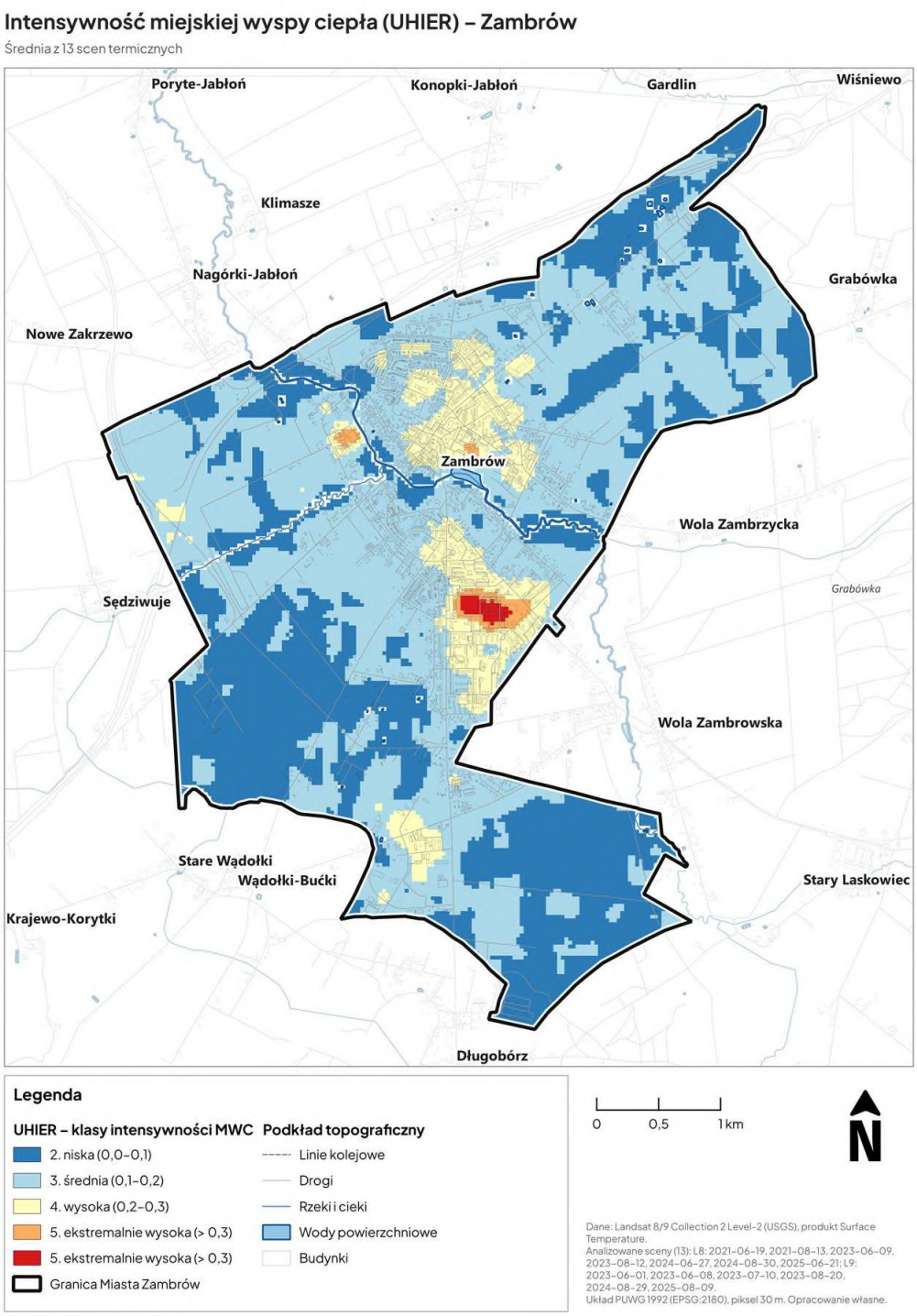
Rysunek 4. Zasięg powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła na terenie Miasta Zambrów

Intensywność miejskiej wyspy ciepła (wskaźnik UHIER)

Natężenie zjawiska sklasyfikowano w pięciu stopniach na podstawie wskaźnika UHIER, obliczonego zgodnie z konwencją przyjętą w „Poradniku technicznym" jako iloraz różnicy między temperaturą powierzchni danego piksela a temperaturą tła termicznego oraz temperaturą tła termicznego, przy obu wielkościach wyrażonych w stopniach Celsjusza. Granice klas przyjęto na poziomie 0,0, 0,1, 0,2 i 0,3. Tak zbudowany iloraz jest wielkością zależną od przyjętej skali

temperatury, wobec czego wartości wskaźnika i granice klas pozostają porównywalne wyłącznie w obrębie analiz wykonanych tą samą metodą.

Na obszarze Zambrowa nie wystąpiła klasa pierwsza, odpowiadająca wyspie chłodu. Klasa niska obejmuje tereny rolne i otwarte otaczające zabudowę oraz dolinę Jabłonki, klasa średnia pas zabudowy rozproszonej i tereny przejściowe, natomiast klasa wysoka tworzy dwa zwarte i rozległe pola: pierwsze w rdzeniu śródmieścia i na osiedlach zabudowy wielorodzinnej na północ od rzeki, drugie na terenach aktywności gospodarczej w części południowej. Klasa ekstremalnie wysoka występuje punktowo, w postaci zwartego pola w obrębie zabudowy przemysłowej w południowej części miasta oraz niewielkiej enklawy przy zachodniej granicy administracyjnej. Rozmieszczenie klas pokrywa się z zasięgiem powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła i wyznacza obszar priorytetowy dla działań adaptacyjnych.



Rysunek 5. Intensywność miejskiej wyspy ciepła na terenie Miasta Zambrów według klas wskaźnika UHIER

2.2. Analiza pokrycia terenu, zasobów zieleni i dostępności miejsc chłodu

Uzupełnieniem analizy termalnej jest rozpoznanie struktury pokrycia terenu oraz zasobów zieleni wysokiej, decydujących o zdolności miasta do łagodzenia przegrzewania. Analizę pokrycia terenu wykonano na danych satelitarnej mapy pokrycia terenu S2GLC PL (NSIS oraz Polska Agencja Kosmiczna) dla rocznika 2025, o rozdzielczości piksela 10 m, w układzie PUWG 1992 (EPSG:2180). Inwentaryzację zasobów zieleni miasta, obejmującą lokalizację terenów zieleni wraz z pokryciem terenu zielenią, gęstość zadrzewienia oraz strukturę systemu błękitno-zielonej

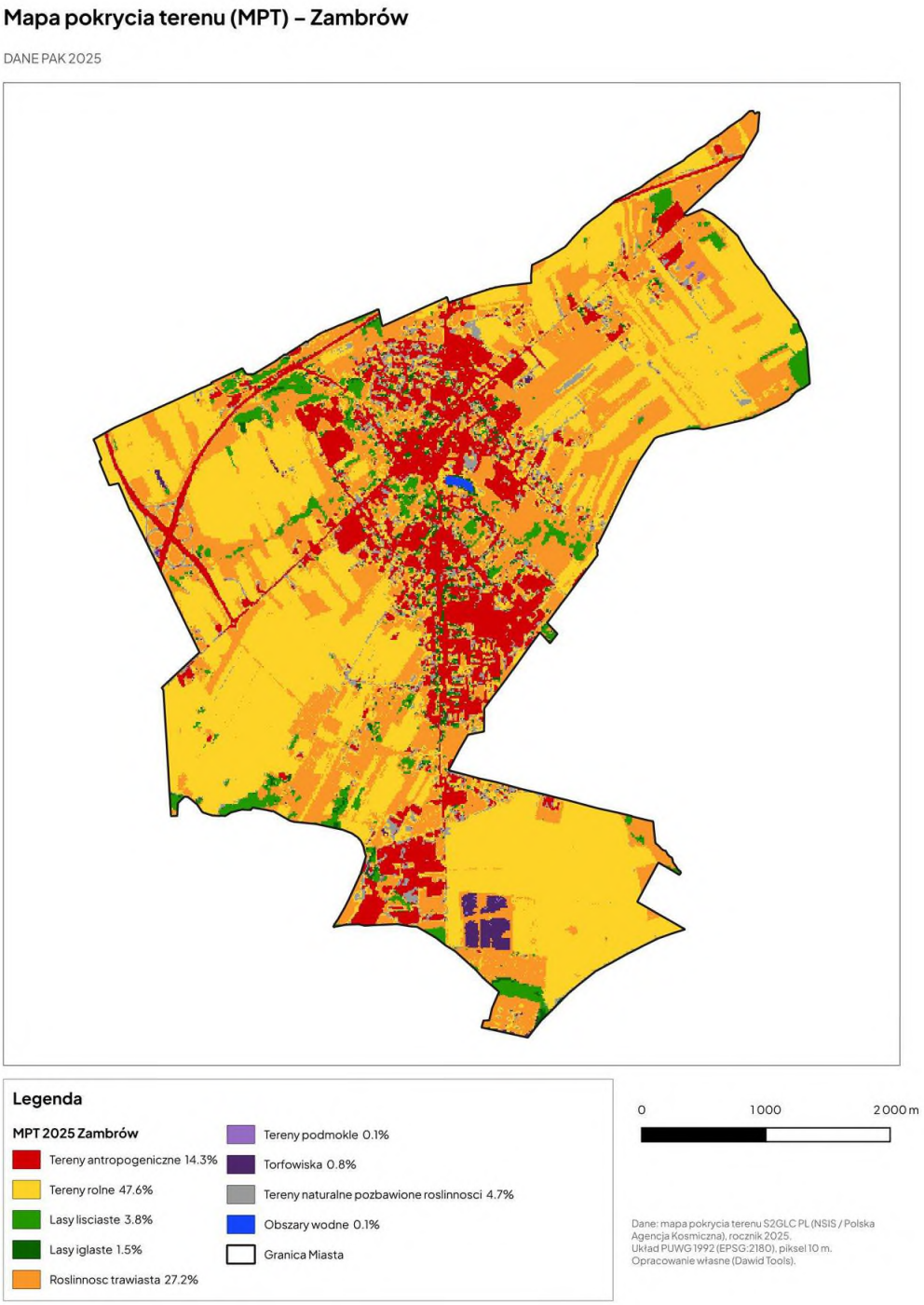
infrastruktury, przedstawiono w Załączniku II „Koncepcja zazieleniania miasta Zambrowa". Mapy te nie są w niniejszym opracowaniu powtarzane; omówiono wyłącznie wnioski, jakie wynikają z nich dla rozkładu i natężenia miejskiej wyspy ciepła.

Tabela 2. Struktura pokrycia terenu Miasta Zambrów według mapy pokrycia terenu S2GLC PL, rocznik 2025

Klasa pokrycia terenu	**Udział w powierzchni miasta [%]**
Tereny rolne	47,6
Roślinność trawiasta	27,2
Tereny antropogeniczne	14,3
Tereny naturalne pozbawione roślinności	4,7
Lasy liściaste	3,8
Lasy iglaste	1,5
Torfowiska	0,8
Tereny podmokłe	0,1
Obszary wodne	0,1

Źródło: opracowanie własne na podstawie mapy pokrycia terenu S2GLC PL (NSIS / Polska Agencja Kosmiczna), rocznik 2025.

Tereny antropogeniczne, obejmujące zabudowę, drogi, place i parkingi, zajmują 14,3 % powierzchni miasta i tworzą zwarty, południkowo wydłużony pas pokrywający się z zasięgiem powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła przedstawionym w podrozdziale 2.1. Udział lasów jest znikomy i wynosi łącznie 5,3 %, przy czym w granicach ścisłej zabudowy praktycznie nie występują one wcale. Prawie trzy czwarte powierzchni miasta zajmują tereny rolne i roślinność trawiasta, które jednak, ze względu na położenie na obrzeżach i brak ciągłości z wnętrzem tkanki miejskiej, tylko w ograniczonym stopniu łagodzą przegrzewanie obszarów zabudowanych.



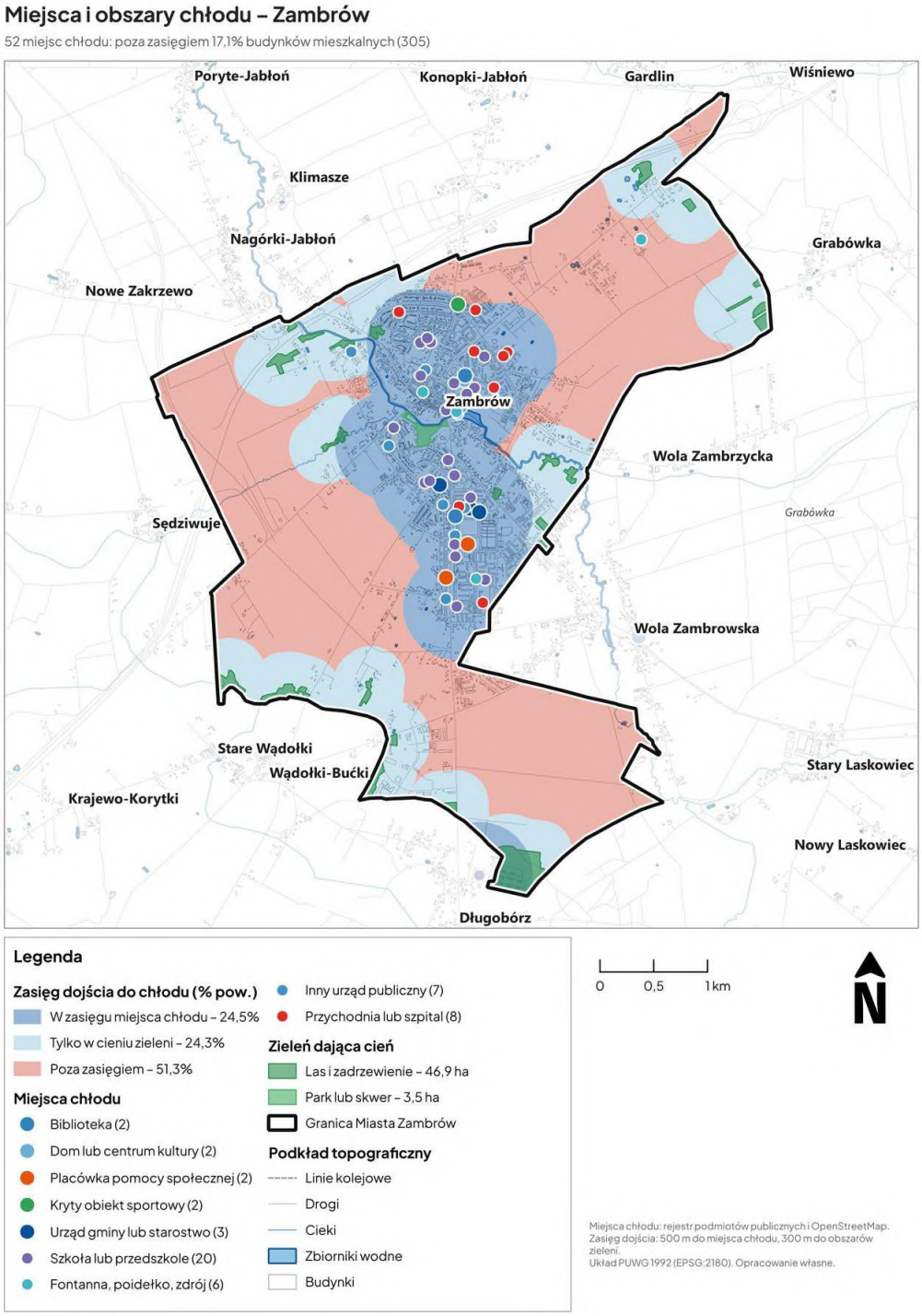
Rysunek 6. Struktura pokrycia terenu Miasta Zambrów według mapy pokrycia terenu S2GLC PL, rocznik 2025

Według modeli 3D drzew LoD1 (GUGiK), na podstawie których w Załączniku II opracowano mapę gęstości zadrzewienia (Załącznik II, rys. 3), w granicach administracyjnych miasta występuje 41 008 drzew, co odpowiada średniemu zagęszczeniu 21 drzew na hektar przy lokalnym maksimum 211 drzew na hektar; średnia wysokość drzewa wynosi 10,4 m. Zestawienie tej mapy oraz mapy terenów zieleni i pokrycia terenu zielenią (Załącznik II, rys. 2) z zasięgiem powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła i klasami wskaźnika UHIER (rys. 4 i rys. 5) prowadzi do następujących wniosków:

- **Najwyższe natężenie zjawiska tam, gdzie brakuje zieleni:** pole klasy ekstremalnie wysokiej wskaźnika UHIER na terenach aktywności gospodarczej i zabudowy poprzemysłowej w południowej części miasta pokrywa się z obszarem o najmniejszym zagęszczeniu drzew w obrębie zwartej zabudowy. Jest to fragment miasta o największym deficycie zieleni wysokiej w relacji do obciążenia termicznego, co koresponduje z oceną zawartą w Załączniku II, w którym strefy przemysłowe i magazynowe oraz tereny po dawnych zakładach bawełnianych zaliczono do terenów w stanie niezadowalającym, pozbawionych zieleni izolacyjnej.
- **Rozproszone zadrzewienia nie znoszą wyspy ciepła w zabudowie mieszkaniowej:** północne pole klasy wysokiej, obejmujące śródmieście i osiedla na północ od doliny Jabłonki, leży w strefie o umiarkowanym, a miejscami wysokim zagęszczeniu drzew. Zadrzewienia przydomowe, osiedlowe i przyuliczne ograniczają nagrzewanie w swoim bezpośrednim otoczeniu, co potwierdziły pomiary termowizyjne (od 6,6 °C różnicy pomiędzy koroną drzewa a jezdnią do 15,0 °C pomiędzy nawierzchnią w cieniu koron a jej odsłoniętym fragmentem, por. podrozdz. 2.3), jednak przy dużym udziale dachów, jezdni i parkingów nie obniżają klasy natężenia zjawiska w skali kwartału. O efekcie chłodzącym decyduje zatem nie sama liczba drzew, lecz to, czy ich korony zacieniają powierzchnie najsilniej akumulujące ciepło.
- **Małe tereny zieleni urządzonej działają lokalnie:** poza terenami nad zalewem (4,37 ha) parki i skwery Zambrowa mają powierzchnię od ok. 0,25 ha (park przy ul. Piłsudskiego) do ok. 1,2 ha (Księży Lasek przy ul. Cmentarnej) i skupiają się w centrum, w sąsiedztwie doliny Jabłonki (Załącznik II, tabela 1 i rys. 2). Obiekty tej wielkości tworzą punktowe enklawy chłodu, co potwierdził pomiar we wnętrzu parku przy placu gen. Władysława Sikorskiego (por. podrozdz. 2.3.8), lecz nie równoważą nagrzewania otaczających je kwartałów zabudowy.
- **Tereny otwarte chłodzą bez udziału zieleni wysokiej:** wschodnia i południowo-wschodnia część miasta jest niemal pozbawiona drzew, a mimo to należy do klasy niskiej wskaźnika UHIER. O niskiej temperaturze powierzchni decyduje tam ciągła pokrywa roślinności uprawnej i trawiastej, a nie zadrzewienie. Dla ograniczania zjawiska w skali miasta równie istotne jak nasadzenia jest zatem niedopuszczanie do uszczelniania tych terenów, na które Załącznik II wskazuje w kontekście postępującej suburbanizacji i przygotowywania nowych terenów inwestycyjnych.
- **Dolina Jabłonki jako oś chłodu:** w strukturze systemu błękitno-zielonej infrastruktury (Załącznik II, rys. 4) dolina Jabłonki wraz z Zalewem Miejskim stanowi oś hydrologiczną i główny korytarz ekologiczny miasta. W obrazie termalnym ten sam pas pozostaje poza zasięgiem powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła i rozdziela jej dwa główne pola, pełniąc funkcję korytarza chłodu i przewietrzania. Wzmacnianie zieleni w dolinie, przewidziane w kierunkach działań Załącznika II, ma więc bezpośrednie znaczenie dla ograniczania zjawiska, pod warunkiem zachowania ciągłości i niezabudowanego charakteru doliny.

Odrębnym elementem analizy jest dostępność miejsc chłodu, czyli obiektów, w których mieszkaniec może w czasie fali upałów schronić się przed wysoką temperaturą. Na obszarze Zambrowa zidentyfikowano 52 takie miejsca, w tym 20 szkół i przedszkoli, 8 przychodni i placówek ochrony zdrowia, 7 innych urzędów publicznych, 6 fontann, poidełek i zdrojów, 3 urzędy gminy lub starostwa, 2 biblioteki, 2 domy i centra kultury, 2 placówki pomocy społecznej oraz 2 kryte obiekty sportowe. Przy założeniu 500 m dojścia pieszego do miejsca chłodu i 300 m

do obszaru zieleni dającej cień, w zasięgu miejsca chłodu znajduje się 24,5 % powierzchni miasta, kolejne 24,3 % pozostaje wyłącznie w zasięgu cienia zieleni, natomiast 51,3 % powierzchni znajduje się poza zasięgiem jednego i drugiego. Poza zasięgiem miejsc chłodu pozostaje 305 budynków mieszkalnych, czyli 17,1 % ich ogólnej liczby. Zieleń dająca cień obejmuje 46,9 ha lasów i zadrzewień oraz zaledwie 3,5 ha parków i skwerów.



Rysunek 7. Rozmieszczenie miejsc chłodu oraz zasięg dojścia pieszego do chłodu na terenie Miasta Zambrów

2.3. Terenowe badania termowizyjne

Terenowe rozpoznanie zjawiska miejskiej wyspy ciepła na obszarze Zambrowa przeprowadzono w dwóch sesjach pomiarowych, obejmujących łącznie 31 stanowisk. Sesja I, wykonana 29 lipca 2026 r. w godzinach popołudniowych, przy zachmurzeniu zmieniającym się od całkowitego do umiarkowanego, objęła 18 stanowisk: park handlowy wraz z zapleczem parkingowym, osiedla zabudowy wielorodzinnej przy ul. gen. Stefana Kosseckiego i ul. Kazimierza Pułaskiego, skrzyżowanie dróg krajowych nr 63 i nr 66 wraz z przyległą zabudową, place utwardzone przy obiektach użyteczności publicznej, ulice obsługujące tereny aktywności gospodarczej oraz zespół garaży. Sesja II, przeprowadzona 30 lipca 2026 r. w godzinach przedpołudniowych, przy bezchmurnym niebie i pełnym nasłonecznieniu, objęła 13 stanowisk: plac gen. Władysława Sikorskiego wraz z fontanną i parkiem, ciągi uliczne i pierzeje śródmieścia, parkingi śródmiejskie i osiedlowe oraz rozległe place utwardzone na obrzeżach centrum.

Zestawienie obu terminów daje obraz zjawiska obejmujący wszystkie zasadnicze kategorie przestrzeni miejskiej Zambrowa, a zarazem dwa skrajnie odmienne stany pogodowe. Sesja I dokumentuje tempo oddawania ciepła przez powierzchnie miejskie w warunkach ograniczonego dopływu promieniowania słonecznego, sesja II zaś skalę nagrzewania w warunkach zbliżonych do dnia upalnego. Porównania pomiędzy sesjami należy formułować ostrożnie: różnice odczytów wynikają nie tylko z rodzaju powierzchni, lecz również z pory dnia i warunków pogodowych, dlatego zestawienia ilościowe prowadzono przede wszystkim w obrębie pojedynczych kadrów.

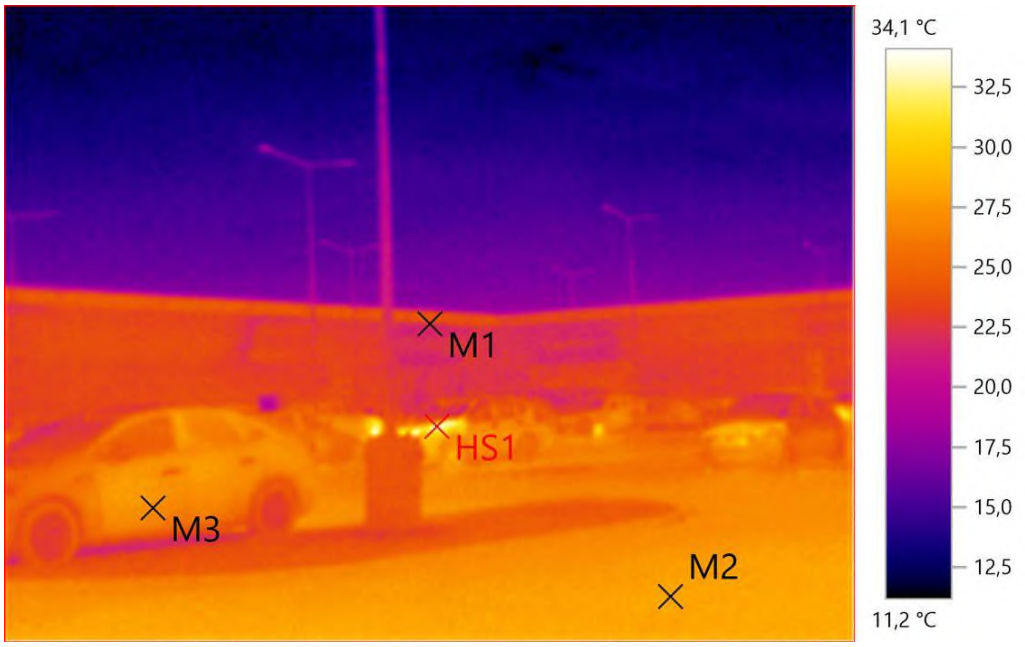
Pomiary wykonano kamerą termowizyjną przy współczynniku emisyjności $\varepsilon = 0{,}95$ i temperaturze odbitej przyjętej na poziomie 20 °C. Dla każdego stanowiska zarejestrowano termogram oraz fotografię rzeczywistą sceny. Dla każdego kadru podano zakres temperatury odpowiadający rzeczywistemu minimum i maksimum w danym ujęciu, zgodnie ze skalą barwną umieszczoną przy termogramie, oraz wartości w punktach pomiarowych oznaczonych symbolami M1 i kolejnymi, a także punkt najwyższej temperatury oznaczony symbolem HS1. W kadrach obejmujących nieboskłon najniższa wartość skali odpowiada pozornej temperaturze nieba, a nie temperaturze powierzchni czynnej, i nie jest wykorzystywana w porównaniach.

2.3.1. Sesja I: park handlowy i jego zaplecze parkingowe

Pierwsze ujęcie sesji I obejmuje największy w mieście zespół handlowy wraz z towarzyszącym mu placem postojowym, a więc jedną z najrozleglejszych jednorodnych powierzchni nieprzepuszczalnych w strukturze Zambrowa.

Stanowisko 1 | zakres w kadrze 11,2–34,1 °C

Kadr obejmuje pierzeję pawilonów handlowych przy ul. Białostockiej wraz z rozległym placem postojowym o nawierzchni z kostki betonowej. Nawierzchnia parkingu na pierwszym planie wskazała 28,2 °C, a jej fragment w sąsiedztwie zaparkowanych pojazdów 27,1 °C, podczas gdy elewacja i attyka pawilonów w głębi kadru utrzymywały 22,2 °C. Maksimum w kadrze, 34,1 °C, przypadło na nadwozia samochodów ustawionych wzdłuż pierzei. Najniższa wartość w kadrze, 11,2 °C, odpowiada pozornej temperaturze nieboskłonu i nie stanowi odczytu powierzchni czynnej; zasada ta dotyczy wszystkich ujęć obejmujących niebo i nie jest dalej powtarzana. Mimo pełnego zachmurzenia w czasie pomiaru nawierzchnia postojowa pozostawała o 6,0 °C cieplejsza od zabudowy, co pokazuje, jak długo rozległe płaszczyzny utwardzone oddają zakumulowane w ciągu dnia ciepło.



Rysunek 8. Termogram: parking i pierzeja pawilonów parku handlowego przy ul. Białostockiej



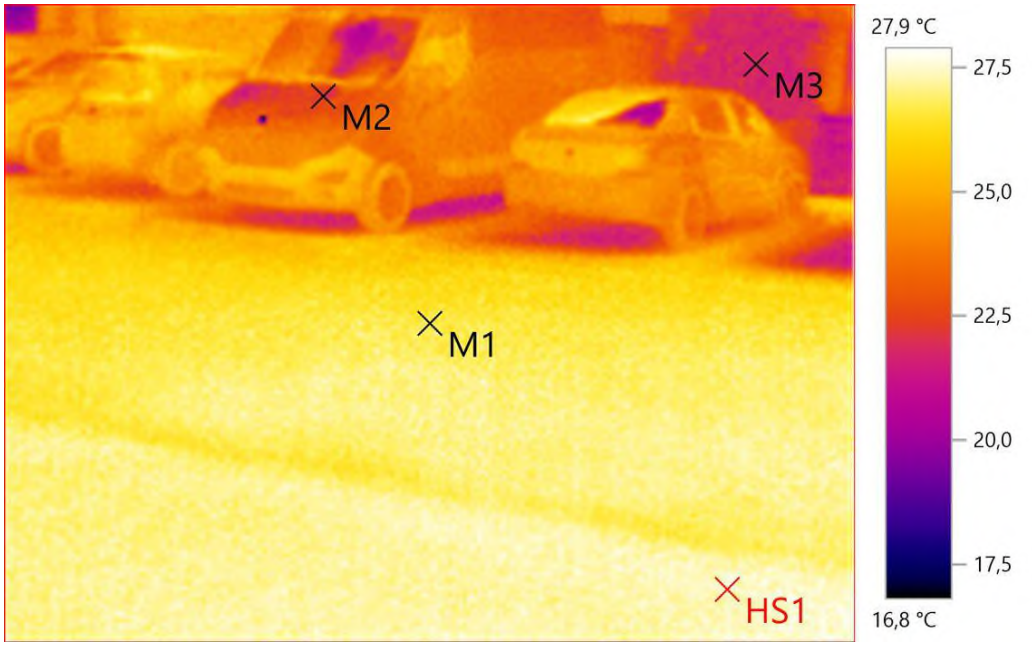
Rysunek 9. Fotografia sceny: parking i pierzeja pawilonów parku handlowego przy ul. Białostockiej

2.3.2. Sesja I: osiedla zabudowy wielorodzinnej i parkingi przyblokowe

Druga grupa stanowisk obejmuje osiedla zabudowy wielorodzinnej w północnej części miasta, przy ul. gen. Stefana Kosseckiego i ul. Kazimierza Pułaskiego. Jest to przestrzeń, w której mieszka znaczna część mieszkańców Zambrowa, a rozległe nawierzchnie parkingów i ciągów pieszo-jezdnych sąsiadują bezpośrednio z zachowanymi fragmentami terenów biologicznie czynnych.

Stanowisko 2 | zakres w kadrze 16,8–27,9 °C

Ujęcie obejmuje miejsca postojowe wzdłuż jezdni osiedlowej u zbiegu ul. gen. Stefana Kosseckiego i ul. Kazimierza Pułaskiego, z zabudową wielorodzinną w tle. Nawierzchnia z kostki betonowej okazała się najcieplejszym elementem sceny: 26,7 °C w części środkowej kadru, przy maksimum 27,9 °C na pierwszym planie. Nadwozia zaparkowanych pojazdów utrzymywały 21,8–22,6 °C, czyli o 4,1 do 6,1 °C mniej niż nawierzchnia, na której stały. Zestawienie to dobrze ilustruje, że w godzinach popołudniowych, po zaniku bezpośredniego nasłonecznienia, głównym powierzchniowym źródłem ciepła na osiedlu pozostaje nawierzchnia, a nie zabudowa ani pojazdy.



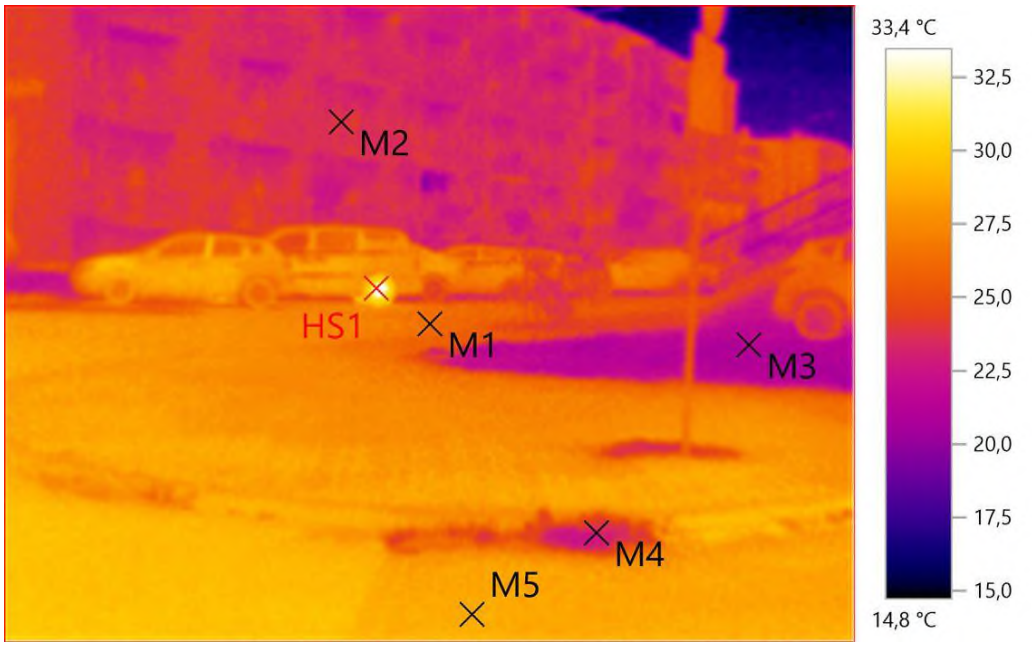
Rysunek 10. Termogram: miejsca postojowe i jezdnia osiedlowa u zbiegu ul. Kosseckiego i ul. Pułaskiego



Rysunek 11. Fotografia sceny: miejsca postojowe i jezdnia osiedlowa u zbiegu ul. Kosseckiego i ul. Pułaskiego

Stanowisko 3 | zakres w kadrze 14,8–33,4 °C

Kadr obejmuje parking przyblokowy przy ul. gen. Stefana Kosseckiego wraz z przylegającym trawnikiem i ciągiem pieszym z kostki betonowej. Nawierzchnia utwardzona osiągnęła 28,8 °C na pierwszym planie i 26,3 °C w części środkowej kadru, natomiast trawiasty klin oddzielający parking od jezdni wskazał 21,2 °C, a pas zieleni przy krawędzi ciągu pieszego 23,2 °C. Elewacja budynku wielorodzinnego utrzymywała 23,8 °C, a najwyższą wartość w kadrze, 33,4 °C, odnotowano na nadwoziu pojazdu. Różnica 7,6 °C pomiędzy trawnikiem a sąsiadującą z nim kostką betonową, zmierzona przy identycznej ekspozycji i w odległości kilku metrów, stanowi bezpośredni argument za utrzymaniem i powiększaniem powierzchni biologicznie czynnej na terenach osiedlowych.



Rysunek 12. Termogram: parking przyblokowy przy ul. Kosseckiego wraz z przylegającym trawnikiem

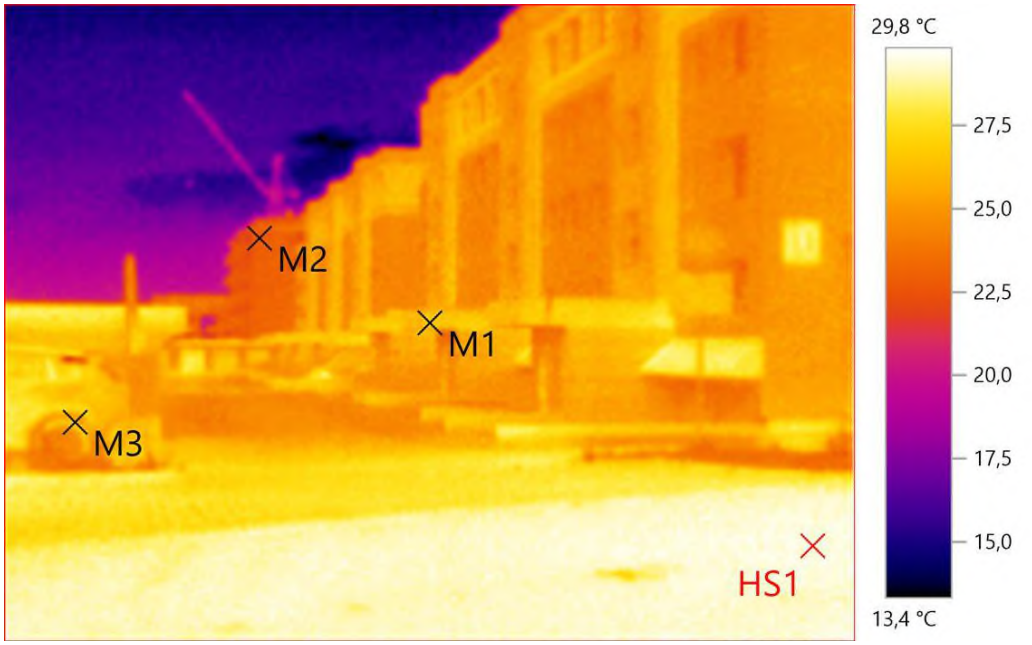


Rysunek 13. Fotografia sceny: parking przyblokowy przy ul. Kosseckiego wraz z przylegającym trawnikiem

Stanowisko 4 | zakres w kadrze 13,4–29,8 °C

Ujęcie dokumentuje ciąg zabudowy wielorodzinnej przy ul. Kazimierza Pułaskiego wraz z przyległą jezdnią. Elewacje budynków wskazały 26,1 °C w partii środkowej i 22,8 °C w partii górnej, dłużej pozostającej w cieniu, a zabudowa niska w lewej części kadru 25,9 °C. Najcieplejszym elementem sceny pozostała nawierzchnia jezdni na pierwszym planie, na której odnotowano maksimum kadru wynoszące 29,8 °C. Różnica 3,7 °C pomiędzy jezdnią a elewacją,

utrzymująca się mimo braku bezpośredniego nasłonecznienia, wynika z większej pojemności cieplnej i niższego albedo nawierzchni bitumicznej.



Rysunek 14. Termogram: ciąg zabudowy wielorodzinnej przy ul. Pułaskiego i przyległa jezdnia



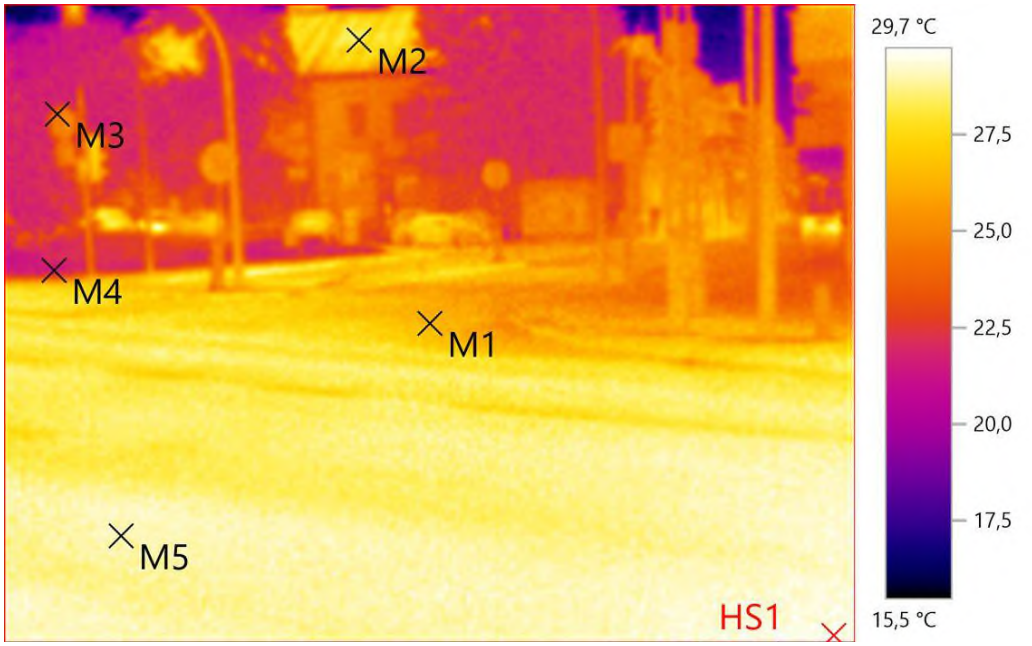
Rysunek 15. Fotografia sceny: ciąg zabudowy wielorodzinnej przy ul. Pułaskiego i przyległa jezdnia

2.3.3. Sesja I: główne ciągi komunikacyjne i skrzyżowania dróg krajowych

Trzecia grupa obejmuje główną oś komunikacyjną miasta, którą tworzą przebiegające przez Zambrów drogi krajowe nr 63 i nr 66. Są to ciągi o największym natężeniu ruchu, o szerokim, w znacznej części odsłoniętym przekroju, stanowiące liniowe źródła ciepła w tkance miejskiej.

Stanowisko 5 | zakres w kadrze 15,5–29,7 °C

Kadr przedstawia skrzyżowanie dróg krajowych nr 63 i nr 66 wraz z przejściem dla pieszych, wyspą zieleni oraz zabudową usługową. Jezdnia stanowiła najcieplejszy element sceny: 29,0 °C na pierwszym planie i 26,3 °C w części środkowej, przy maksimum kadru 29,7 °C. Korony drzew rosnących przy skrzyżowaniu wskazały 22,7 °C, zieleń niska i trawnik 22,1 °C, a elewacja budynku usługowego 27,8 °C. Różnica 6,9 °C pomiędzy powierzchnią biologicznie czynną a nawierzchnią jezdni, odnotowana w obrębie jednego kadru i przy identycznych warunkach pogodowych, potwierdza chłodzące oddziaływanie zieleni przyulicznej nawet w dniu o pełnym zachmurzeniu.



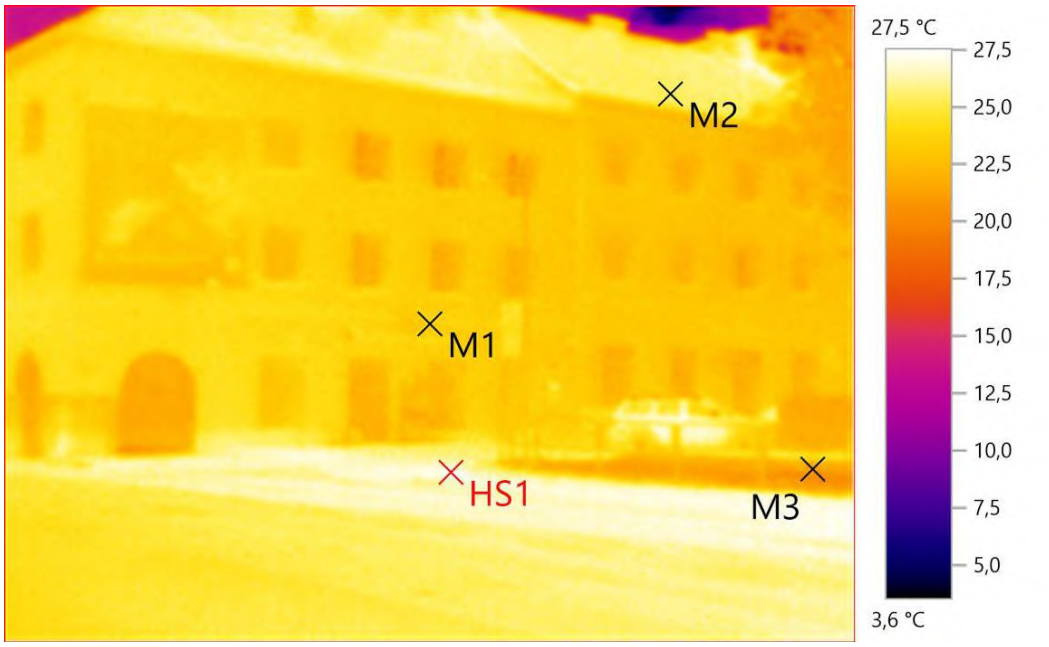
Rysunek 16. Termogram: skrzyżowanie dróg krajowych z przejściem dla pieszych i zielenią przyuliczną



Rysunek 17. Fotografia sceny: skrzyżowanie dróg krajowych z przejściem dla pieszych i zielenią przyuliczną

Stanowisko 6 | zakres w kadrze 3,6–27,5 °C

Ujęcie obejmuje narożny budynek o funkcji mieszkalno-usługowej, kryty dachówką ceramiczną, wraz z przylegającą jezdnią i zielenią przyuliczną. Połać dachowa wskazała 25,4 °C i pozostawała najcieplejszym elementem bryły budynku, elewacja 23,6 °C, a korony drzew rosnących po prawej stronie kadru 21,4 °C. Najwyższa wartość w kadrze, 27,5 °C, przypadła na nawierzchnię jezdni. Zestawienie pokazuje typową dla godzin popołudniowych kolejność stygnięcia: najdłużej ciepło oddaje nawierzchnia drogowa, następnie pokrycie dachowe, najszybciej wychładza się zieleń wysoka.



Rysunek 18. Termogram: narożna zabudowa mieszkalno-usługowa kryta dachówką ceramiczną przy drodze krajowej

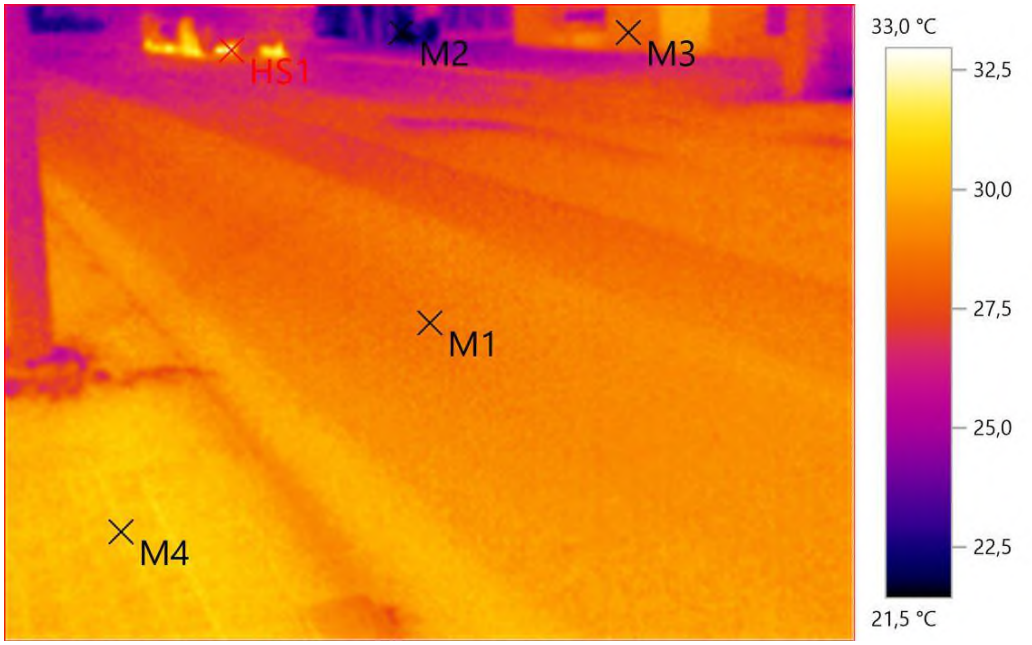


Rysunek 19. Fotografia sceny: narożna zabudowa mieszkalno-usługowa kryta dachówką ceramiczną przy drodze krajowej

Stanowisko 7 | zakres w kadrze 21,5–33,0 °C

Kadr obejmuje ciąg uliczny w sąsiedztwie Miejskiego Przedszkola nr 6 w Zambrowie wraz z chodnikiem z kostki betonowej. Nawierzchnia chodnika na pierwszym planie, w strefie codziennego ruchu pieszego, osiągnęła 30,6 °C i była cieplejsza od sąsiadującej jezdni, na której odnotowano 28,8 °C. Ogrodzenie i zagospodarowanie terenu przy placówce wskazały 28,3 °C, a zacieniony element wyposażenia ulicy w górnej części kadru 22,8 °C. Maksimum kadru, 33,0 °C,

przypadło na oszklenie i elementy elewacji budynku usługowego w lewej części ujęcia. Otoczenie placówki oświatowej, użytkowanej codziennie przez dzieci, należy do przestrzeni o podwyższonej wrażliwości na przegrzewanie i wymaga priorytetowego wprowadzenia zacienienia.



Rysunek 20. Termogram: ciąg uliczny i chodnik w sąsiedztwie Miejskiego Przedszkola nr 6 w Zambrowie



Rysunek 21. Fotografia sceny: ciąg uliczny i chodnik w sąsiedztwie Miejskiego Przedszkola nr 6 w Zambrowie

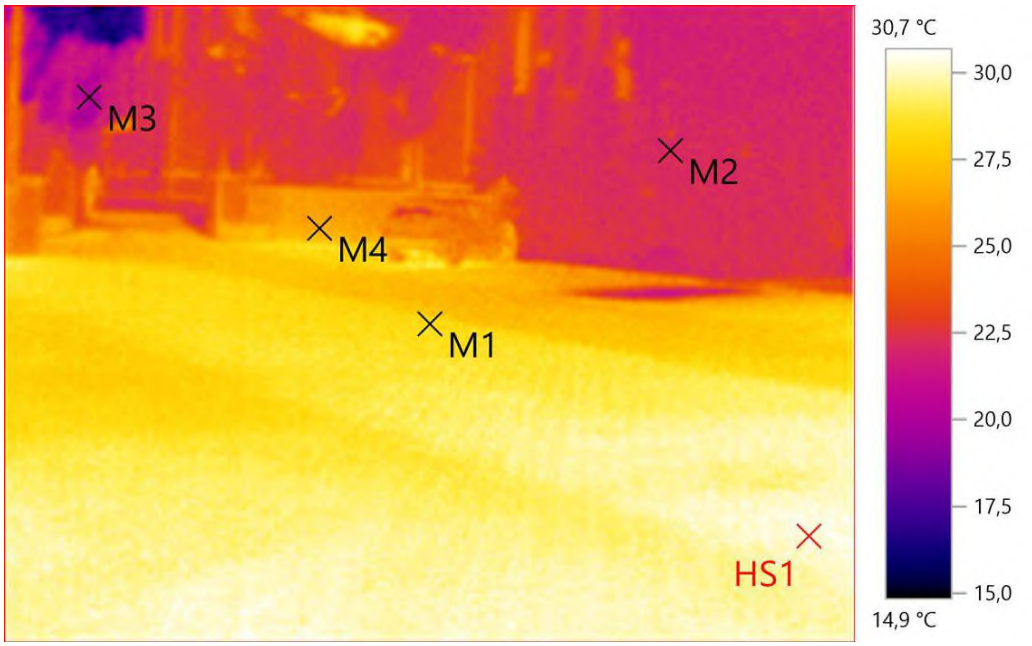
2.3.4. Sesja I: place utwardzone przy obiektach użyteczności publicznej

Czwarta grupa dokumentuje reprezentacyjne i użytkowe place utwardzone towarzyszące obiektom sakralnym, administracyjnym i usługowym. Są to przestrzenie intensywnie użytkowane

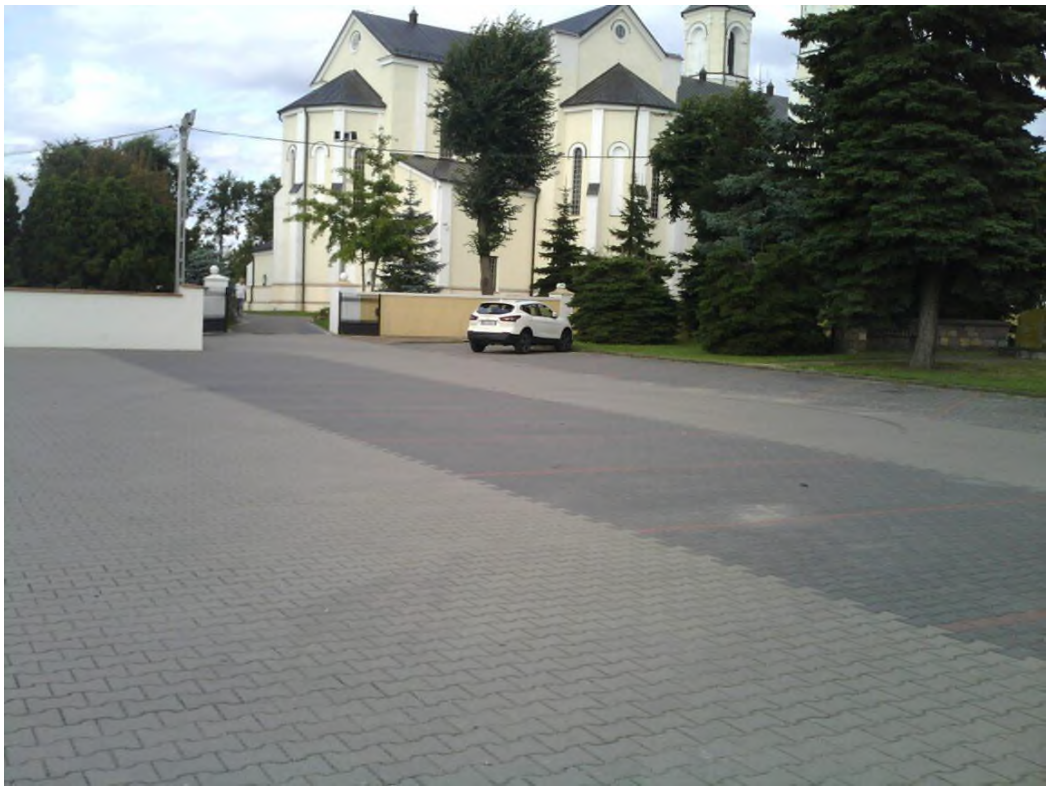
przez mieszkańców, w których nawierzchnia z kostki betonowej zajmuje niemal całą powierzchnię, a zadrzewienie ogranicza się do obrzeży.

Stanowisko 8 | zakres w kadrze 14,9–30,7 °C

Ujęcie dokumentuje rozległy plac utwardzony kostką betonową przed obiektem sakralnym, zamknięty od wschodu szpalerem zieleni wysokiej. Nawierzchnia placu stanowiła najcieplejszy element sceny: 28,2 °C w części środkowej i 26,7 °C w głębi kadru, przy maksimum 30,7 °C na pierwszym planie. Jasna elewacja obiektu utrzymywała 22,2 °C, a korony drzew iglastych rosnących wzdłuż granicy placu 20,6 °C. Różnica 10,1 °C pomiędzy zielenią wysoką a przylegającą do niej nawierzchnią jest najwyraźniejszym kontrastem odnotowanym w sesji I i pokazuje skalę, w jakiej rozległe place utwardzone pozbawione zadrzewienia obciążają termicznie swoje otoczenie.



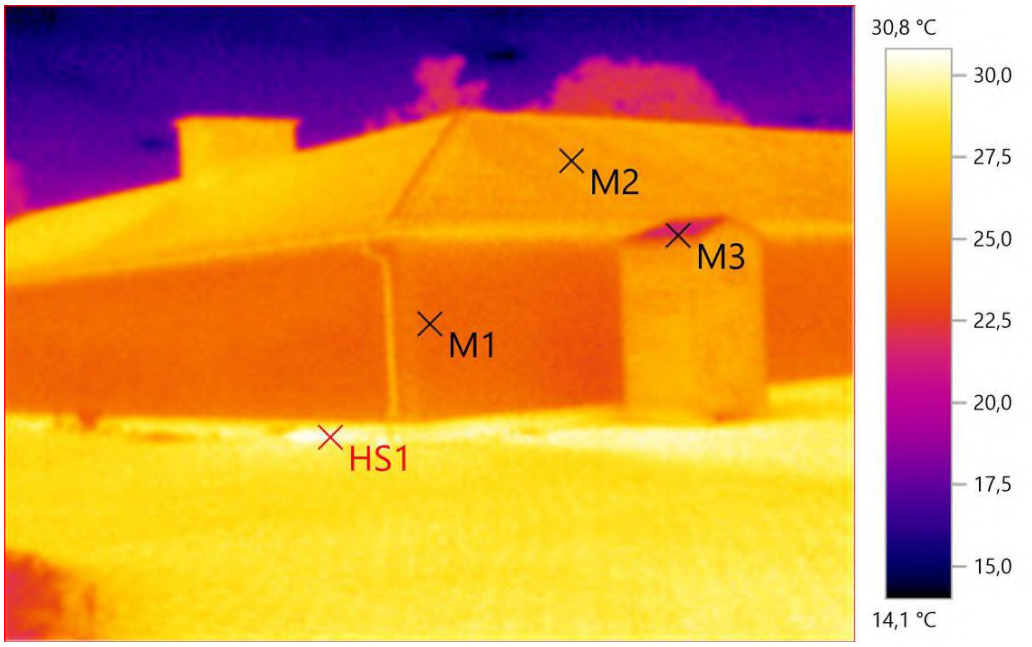
Rysunek 22. Termogram: plac utwardzony przed obiektem sakralnym, zamknięty szpalerem zieleni wysokiej



Rysunek 23. Fotografia sceny: plac utwardzony przed obiektem sakralnym, zamknięty szpalerem zieleni wysokiej

Stanowisko 9 | zakres w kadrze 14,1–30,8 °C

Kadr obejmuje budynek gospodarczy o ciemnym pokryciu dachowym z blachy, przylegający do tego samego placu utwardzonego. Połać dachowa wskazała 26,0 °C, jasna elewacja 24,1 °C, a ściana pozostająca w cieniu 22,6 °C. Maksimum kadru, 30,8 °C, odnotowano na nawierzchni placu u podnóża budynku, a więc o 8,2 °C powyżej najchłodniejszej zmierzonej powierzchni sceny. Ciemne pokrycia blaszane, ze względu na niskie albedo i niewielką pojemność cieplną, nagrzewają się w ciągu dnia najszybciej ze wszystkich elementów bryły budynku i równie szybko oddają ciepło po zaniku nasłonecznienia.



Rysunek 24. Termogram: budynek o ciemnym pokryciu dachowym z blachy przy placu utwardzonym

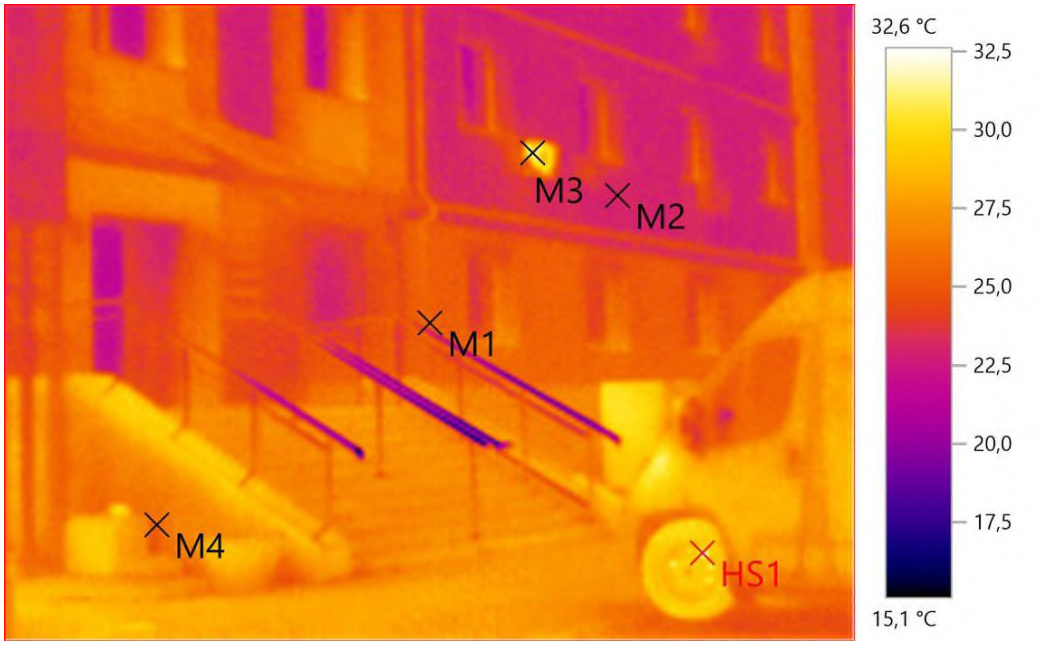


Rysunek 25. Fotografia sceny: budynek o ciemnym pokryciu dachowym z blachy przy placu utwardzonym

Stanowisko 10 | zakres w kadrze 15,1–32,6 °C

Ujęcie obejmuje elewację budynku użyteczności publicznej wyposażonego w zespół jednostek zewnętrznych klimatyzacji, wraz ze schodami wejściowymi i miejscem postojowym. Płaszczyzna elewacji wskazała 25,2 °C, jej jaśniejszy fragment 23,1 °C, natomiast pracująca jednostka zewnętrzna klimatyzacji 27,4 °C, czyli o 4,3 °C więcej niż sąsiadująca z nią ściana. Nawierzchnia i obudowa przy schodach wejściowych osiągnęły 26,2 °C, a maksimum kadru, 32,6 °C, przypadło na nadwozie pojazdu dostawczego. Scena dokumentuje udział ciepła antropogenicznego

w bilansie termicznym miasta: urządzenia chłodzące wnętrza budynków odprowadzają ciepło bezpośrednio do przestrzeni publicznej, podnosząc temperaturę w strefie ruchu pieszego.



Rysunek 26. Termogram: elewacja budynku użyteczności publicznej z zespołem jednostek klimatyzacji

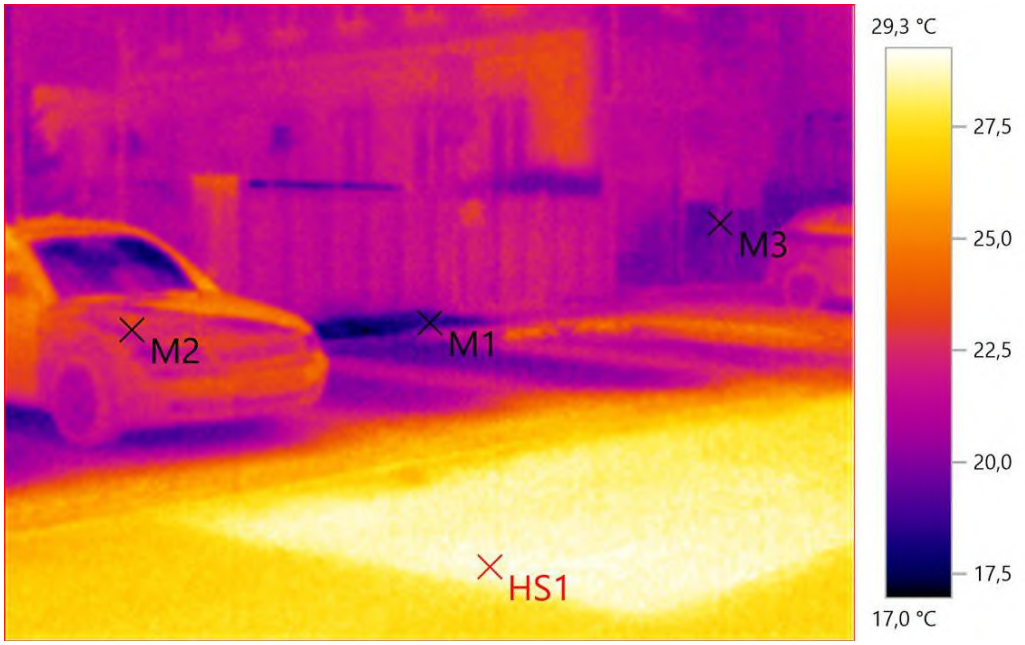


Rysunek 27. Fotografia sceny: elewacja budynku użyteczności publicznej z zespołem jednostek klimatyzacji

Stanowisko 11 | zakres w kadrze 17,0–29,3 °C

Kadr obejmuje miejsca postojowe przed budynkiem administracji publicznej wraz z przylegającą jezdnią. Nawierzchnia parkingu, osłonięta w czasie pomiaru cieniem zabudowy, wskazała 19,4 °C, a elewacja budynku 19,8 °C. Nadwozie ciemnego pojazdu utrzymywało 22,6 °C, natomiast

odsłonięta nawierzchnia jezdni na pierwszym planie osiągnęła maksimum kadru wynoszące 29,3 °C. Różnica 9,9 °C pomiędzy zacienionym a odsłoniętym fragmentem powierzchni utwardzonej, oddalonymi od siebie o kilkanaście metrów, wynika wyłącznie z dostępu promieniowania słonecznego i wskazuje, jak duży efekt daje samo wprowadzenie zacienienia nad miejscami postojowymi.



Rysunek 28. Termogram: miejsca postojowe przed budynkiem administracji publicznej i przyległa jezdnia



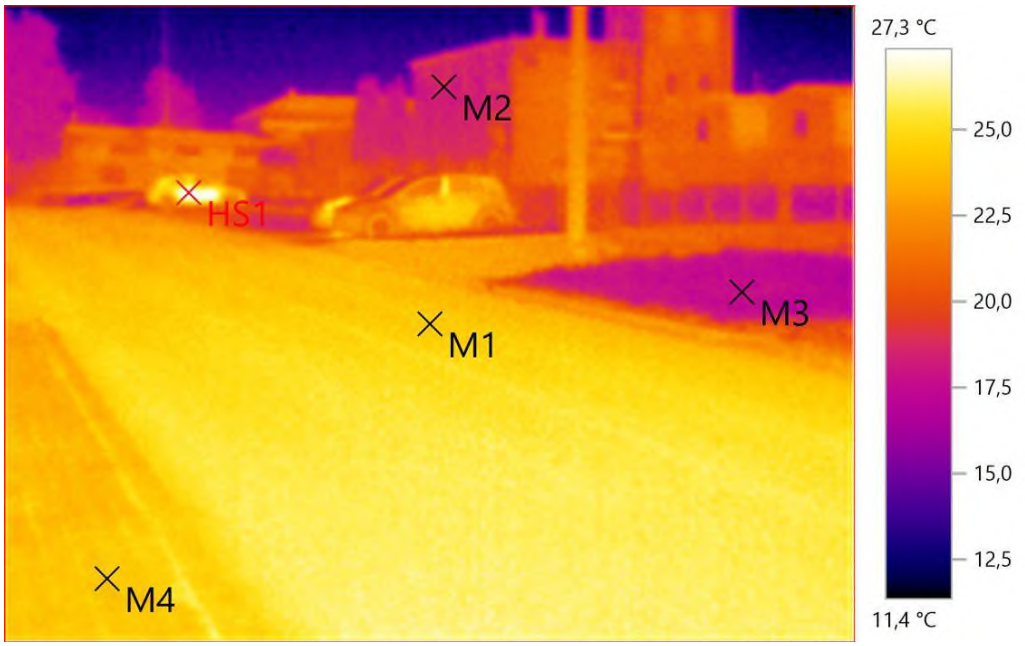
Rysunek 29. Fotografia sceny: miejsca postojowe przed budynkiem administracji publicznej i przyległa jezdnia

2.3.5. Sesja I: ulice obrzeży i tereny aktywności gospodarczej

Piąta grupa obejmuje ulice obsługujące tereny aktywności gospodarczej oraz osiedlowe ciągi komunikacyjne poza ścisłym centrum. Przekroje tych ulic łączą jezdnię bitumiczną, chodnik z kostki betonowej i pas zieleni, co pozwala porównać trzy rodzaje powierzchni w obrębie jednego kadru.

Stanowisko 12 | zakres w kadrze 11,4–27,3 °C

Ujęcie obejmuje ulicę obsługującą tereny aktywności gospodarczej, z jezdnią bitumiczną, chodnikiem z kostki betonowej i pasem trawnika po prawej stronie. Jezdnia wskazała 24,4 °C, chodnik 24,3 °C, natomiast trawnik oddzielający ciąg pieszy od ogrodzenia terenu produkcyjnego 17,7 °C. Elewacje zabudowy magazynowej utrzymywały 18,4 °C. Maksimum kadru, 27,3 °C, przypadło na nadwozie zaparkowanego pojazdu. Różnica 6,7 °C pomiędzy trawnikiem a przylegającą do niego nawierzchnią pokazuje, że nawet wąski pas zieleni przyulicznej tworzy wyraźną strefę buforową.



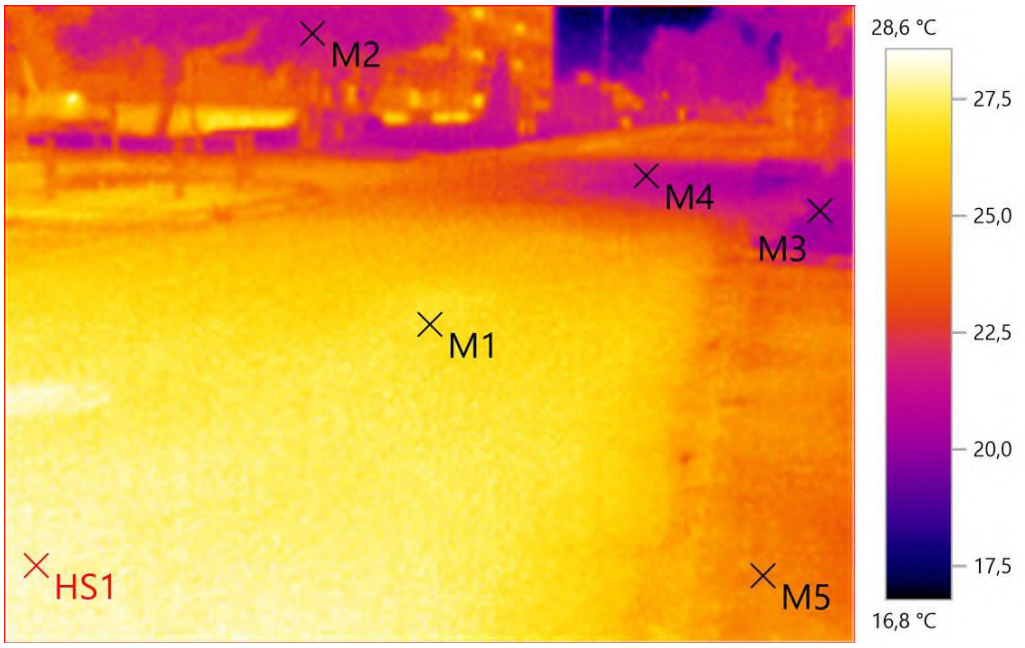
Rysunek 30. Termogram: ulica obsługująca tereny aktywności gospodarczej z chodnikiem i pasem trawnika



Rysunek 31. Fotografia sceny: ulica obsługująca tereny aktywności gospodarczej z chodnikiem i pasem trawnika

Stanowisko 13 | zakres w kadrze 16,8–28,6 °C

Kadr obejmuje skrzyżowanie z przejściem dla pieszych w otoczeniu zabudowy wielorodzinnej i zadrzewienia przyulicznego. Nawierzchnia jezdni wskazała 27,0 °C, przy maksimum kadru 28,6 °C, natomiast chodnik z kostki betonowej po prawej stronie 24,6 °C. Korony drzew rosnących wzdłuż ulicy utrzymywały 20,4 °C i 21,4 °C, a zabudowa w głębi kadru 21,4 °C. Różnica 6,6 °C pomiędzy koroną drzewa a jezdnią, przy odległości kilkunastu metrów, potwierdza, że nawet pojedyncze zadrzewienie przyuliczne kształtuje w swoim sąsiedztwie chłodniejszy mikroklimat.



Rysunek 32. Termogram: skrzyżowanie z przejściem dla pieszych w otoczeniu zabudowy wielorodzinnej i zadrzewienia



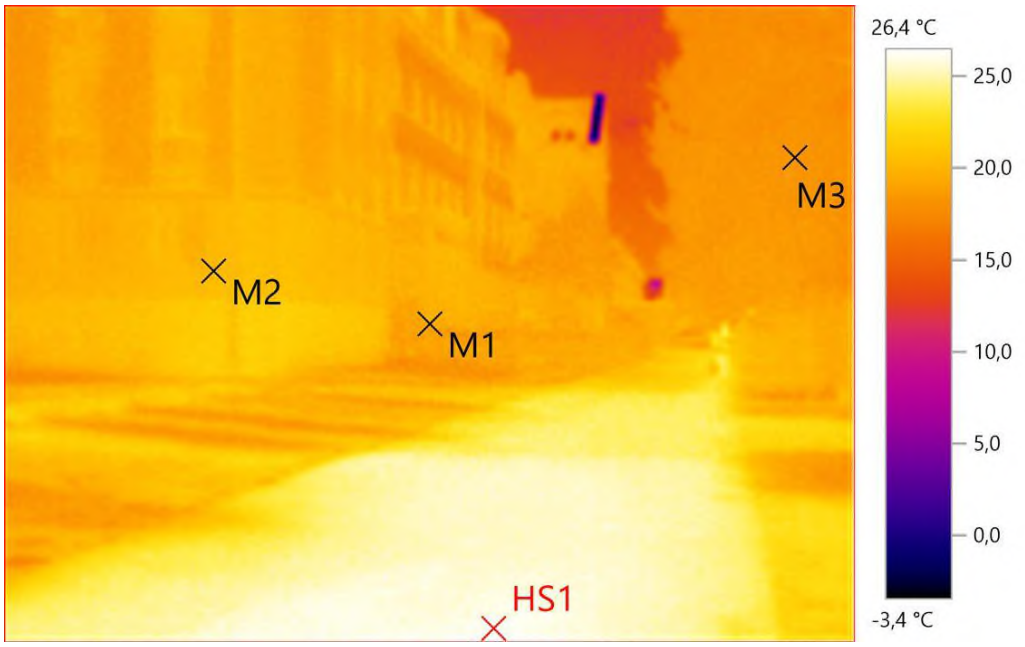
Rysunek 33. Fotografia sceny: skrzyżowanie z przejściem dla pieszych w otoczeniu zabudowy wielorodzinnej i zadrzewienia

2.3.6. Sesja I: parkingi i wnętrza kwartałów zabudowy

Szósta grupa dokumentuje wnętrza kwartałów zabudowy oraz parkingi osłonięte zadrzewieniem. Ujęcia te pozwalają ocenić, jaki efekt daje zacienienie tej samej, jednorodnej nawierzchni utwardzonej.

Stanowisko 14 | zakres w kadrze -3,4–26,4 °C

Ujęcie dokumentuje wewnętrzny plac postojowy zamknięty z jednej strony zabudową biurową, a z drugiej zwartym szpalerem drzew. Nawierzchnia betonowa pozostająca w cieniu wskazała 19,2 °C, elewacja budynku 20,3 °C, a korony drzew 18,3 °C. Maksimum kadru, 26,4 °C, odnotowano na odsłoniętym fragmencie tej samej nawierzchni w dolnej części ujęcia. Różnica 7,2 °C w obrębie jednej, jednorodnej powierzchni utwardzonej wynika wyłącznie z zacienienia przez szpaler drzew i stanowi bezpośrednie uzasadnienie dla obsadzania obrzeży parkingów zielenią wysoką.



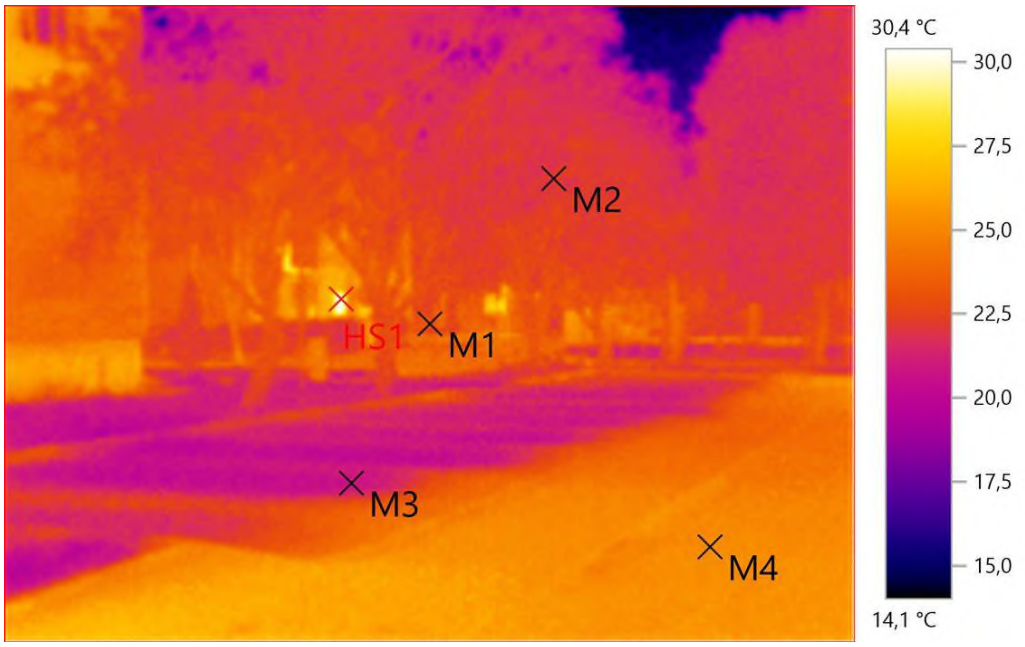
Rysunek 34. Termogram: wewnętrzny plac postojowy zamknięty zabudową biurową i szpalerem drzew



Rysunek 35. Fotografia sceny: wewnętrzny plac postojowy zamknięty zabudową biurową i szpalerem drzew

Stanowisko 15 | zakres w kadrze 14,1–30,4 °C

Kadr obejmuje parking przyblokowy osłonięty szpalerem starszych drzew liściastych, z jezdnią osiedlową po prawej stronie. Nawierzchnia miejsc postojowych pozostających w cieniu koron wskazała 21,0 °C, korony drzew 22,2 °C, a zabudowa i zieleń w głębi kadru 23,1 °C. Jezdnia położona poza zasięgiem cienia osiągnęła 25,2 °C, przy maksimum kadru 30,4 °C odnotowanym na rozgrzanym elemencie zagospodarowania ulicy. Zacienienie obniżyło temperaturę nawierzchni o 4,2 °C względem sąsiadującej jezdni, zmierzonej tego samego dnia i o tej samej godzinie.



Rysunek 36. Termogram: parking przyblokowy osłonięty szpalerem starszych drzew liściastych



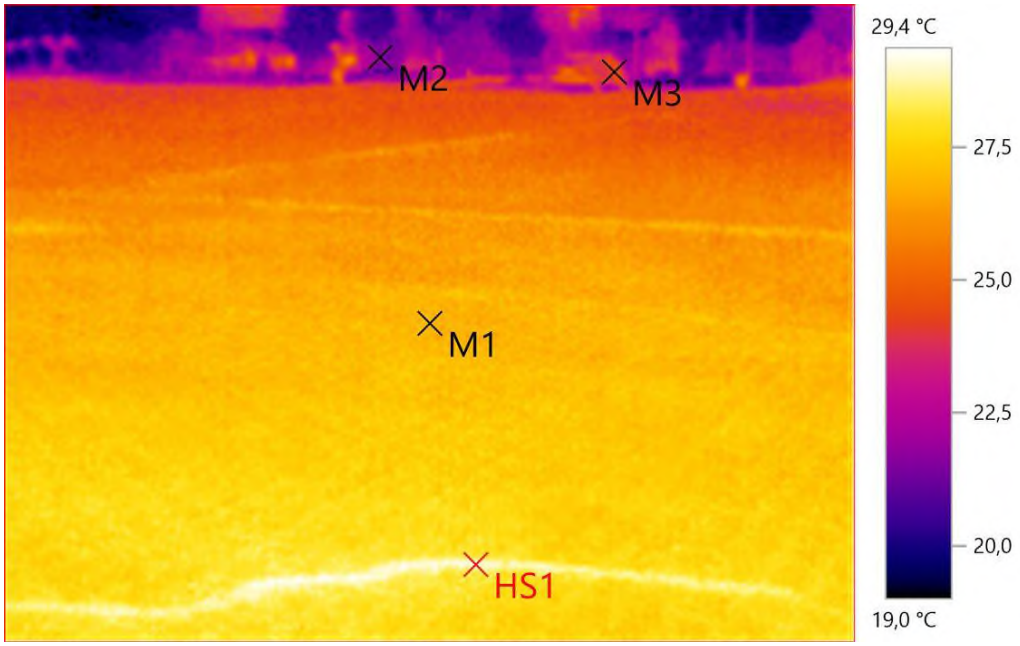
Rysunek 37. Fotografia sceny: parking przyblokowy osłonięty szpalerem starszych drzew liściastych

2.3.7. Sesja I: rozległe place utwardzone i zespoły garaży

Ostatnia grupa sesji I obejmuje rozległe place utwardzone oraz zespół garaży o przegrodach z blachy stalowej. Są to przestrzenie o najwyższym udziale powierzchni nieprzepuszczalnych i najniższym udziale zieleni w całym mieście.

Stanowisko 16 | zakres w kadrze 19,0–29,4 °C

Ujęcie obejmuje rozległy, jednorodny plac utwardzony kostką betonową, obudowany od północy szpalerem drzew i zabudową usługową. Nawierzchnia placu wskazała 26,9 °C w części środkowej, przy maksimum kadru 29,4 °C na pierwszym planie, natomiast korony drzew zamykających plac 21,5 °C, a zabudowa w tle 23,9 °C. Różnica 7,9 °C pomiędzy zadrzewieniem a nawierzchnią oraz całkowita jednorodność termiczna płyty placu pokazują, że rozległe powierzchnie utwardzone pozbawione wewnętrznego zadrzewienia zachowują się jak jeden, pozbawiony zróżnicowania mikroklimatycznego akumulator ciepła.



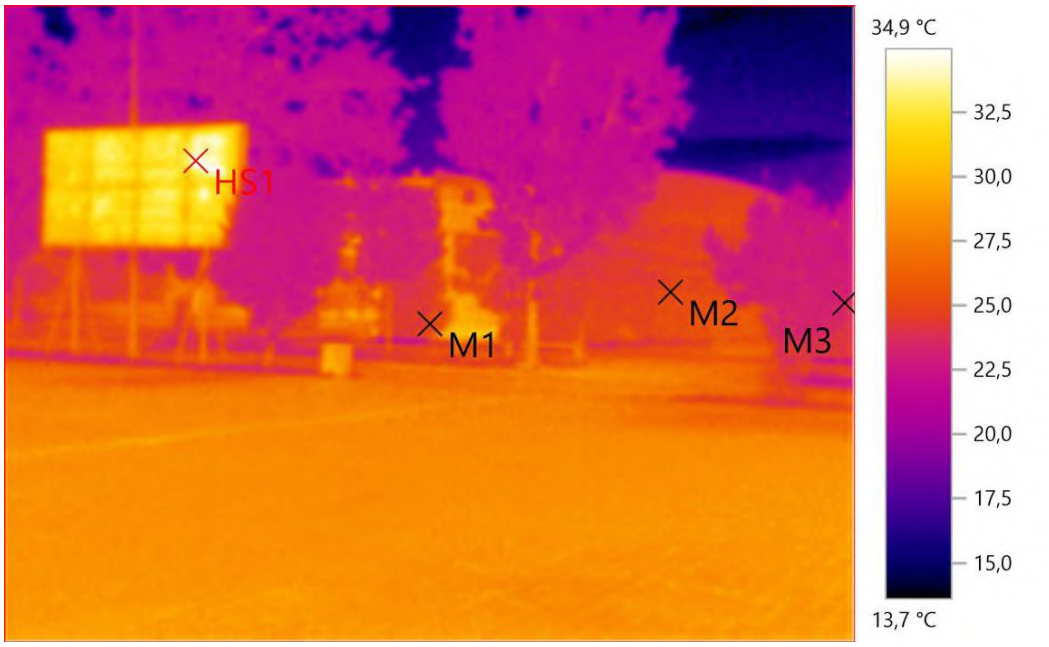
Rysunek 38. Termogram: rozległy plac utwardzony kostką betonową zamknięty szpalerem drzew



Rysunek 39. Fotografia sceny: rozległy plac utwardzony kostką betonową zamknięty szpalerem drzew

Stanowisko 17 | zakres w kadrze 13,7–34,9 °C

Kadr obejmuje zachodni fragment tego samego placu wraz z wolnostojącymi tablicami reklamowymi i szpalerem drzew. Nawierzchnia placu utrzymywała 25,0 °C, podobnie jak zadrzewienie i zabudowa w prawej części kadru, gdzie odnotowano 25,0 °C oraz 23,3 °C. Najwyższą wartość w kadrze, 34,9 °C, zarejestrowano na powierzchni wielkoformatowej tablicy reklamowej, a więc na elemencie o niewielkiej masie, pełnej ekspozycji i bardzo ograniczonej zdolności odprowadzania ciepła. Różnica 9,9 °C względem nawierzchni pokazuje, że nośniki reklamowe i podobne konstrukcje wielkopowierzchniowe stanowią w przestrzeni publicznej samodzielne, zwykle pomijane źródła ciepła.



Rysunek 40. Termogram: zachodni fragment placu utwardzonego z wolnostojącymi tablicami reklamowymi

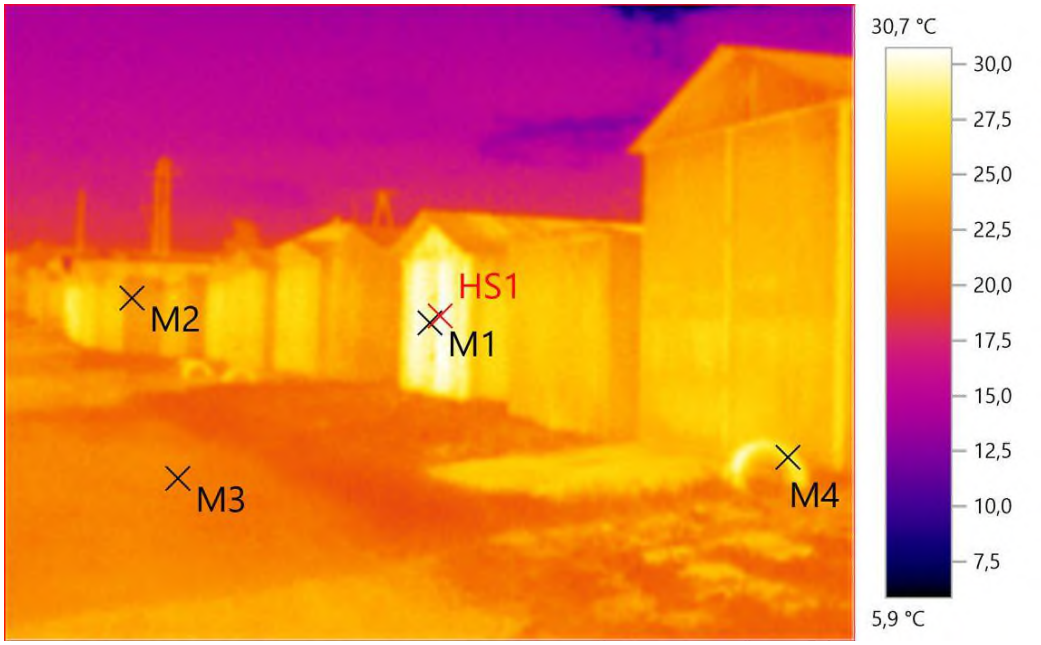


Rysunek 41. Fotografia sceny: zachodni fragment placu utwardzonego z wolnostojącymi tablicami reklamowymi

Stanowisko 18 | zakres w kadrze 5,9–30,7 °C

Ostatnie ujęcie sesji I obejmuje zespół garaży o ścianach i pokryciach z blachy stalowej, z drogą gruntową i pasem trawy na pierwszym planie. Blaszana ściana garażu eksponowana na niskie, popołudniowe promieniowanie słoneczne wskazała 29,8 °C, przy maksimum kadru 30,7 °C, a ściany garaży położonych w głębi ciągu 24,0 °C. Droga gruntowa utrzymywała 22,5 °C, natomiast element wyposażenia przy garażu 26,2 °C. Różnica 8,2 °C pomiędzy nasłonecznioną blachą

a przepuszczalną nawierzchnią gruntową ilustruje, jak silnie cienkościenne przegrody metalowe reagują na chwilową ekspozycję słoneczną, nawet w schyłkowej fazie dnia.



Rysunek 42. Termogram: zespół garaży o przegrodach z blachy stalowej przy drodze gruntowej



Rysunek 43. Fotografia sceny: zespół garaży o przegrodach z blachy stalowej przy drodze gruntowej

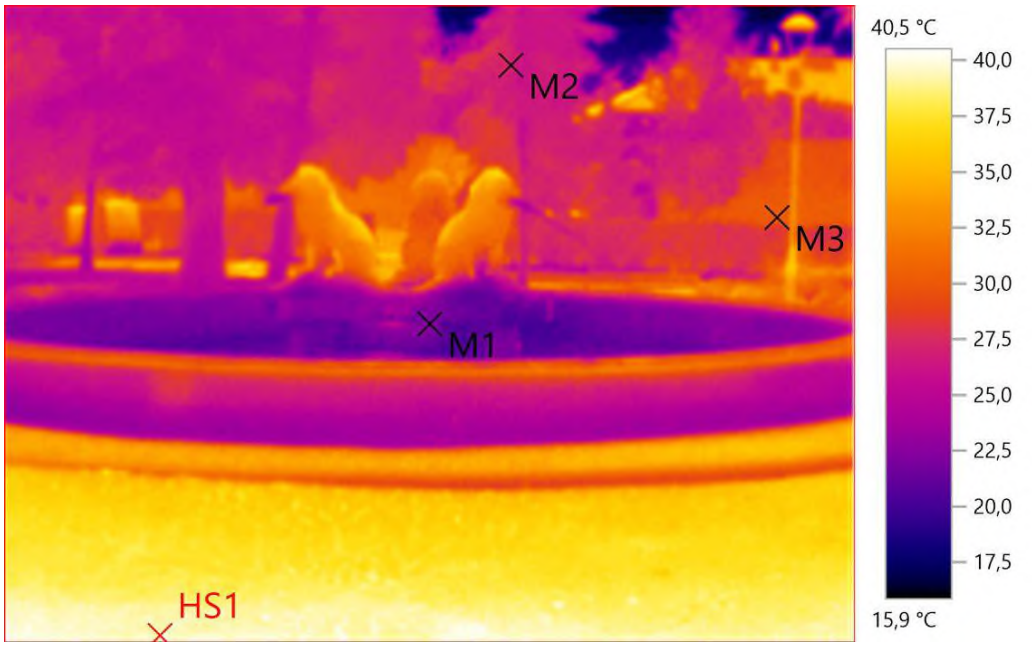
2.3.8. Sesja II: plac gen. Władysława Sikorskiego i chłodzące oddziaływanie wody

Sesja II rozpoczyna się od placu gen. Władysława Sikorskiego, głównej przestrzeni publicznej Zambrowa, obejmującej zabytkową fontannę z lwami wraz z otaczającym ją parkiem. Ujęcia

wykonane w pełnym słońcu pozwalają zmierzyć rzeczywisty, a nie deklarowany efekt chłodzący wody otwartej oraz zieleni parkowej.

Stanowisko 19 | zakres w kadrze 15,9–40,5 °C

Pierwsze ujęcie sesji II obejmuje zabytkową fontannę z lwami na placu gen. Władysława Sikorskiego wraz z otaczającą ją nawierzchnią z kostki betonowej i zielenią parkową. Tafla wody w niecce fontanny wskazała 22,0 °C, korony drzew otaczających plac 26,9 °C, a elementy wyposażenia parku 30,2 °C. Maksimum kadru, 40,5 °C, odnotowano na odsłoniętej nawierzchni z kostki betonowej na pierwszym planie. Różnica 18,5 °C pomiędzy taflą wody a przylegającą do niej nawierzchnią, zmierzona w obrębie jednego kadru i przy identycznym nasłonecznieniu, jest jednym z najmocniejszych udokumentowanych w badaniach dowodów chłodzącego oddziaływania wody otwartej w przestrzeni publicznej.



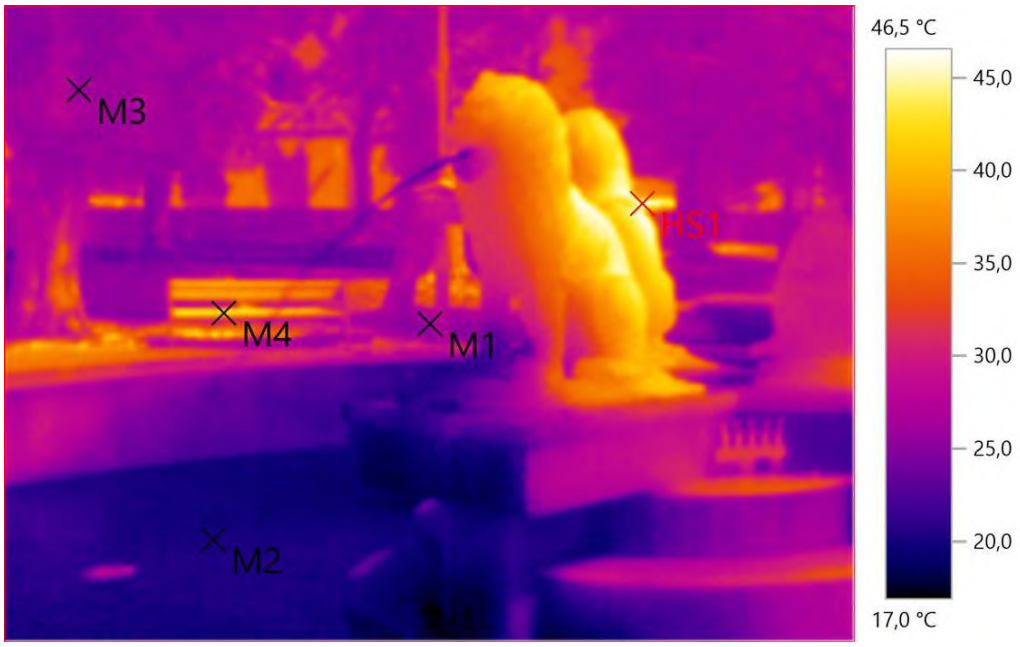
Rysunek 44. Termogram: fontanna z lwami na placu gen. Władysława Sikorskiego wraz z nawierzchnią placu



Rysunek 45. Fotografia sceny: fontanna z lwami na placu gen. Władysława Sikorskiego wraz z nawierzchnią placu

Stanowisko 20 | zakres w kadrze 17,0–46,5 °C

Ujęcie z bliskiej odległości dokumentuje rzeźbiarski zespół fontanny oraz taflę wody w niecce. Kamienne rzeźby lwów, eksponowane na bezpośrednie promieniowanie słoneczne, osiągnęły maksimum kadru wynoszące 46,5 °C. Nasłoneczniona krawędź niecki wskazała 32,3 °C, jej fragment pozostający w cieniu 26,4 °C, a zieleń i zabudowa w tle 26,3 °C. Tafla wody utrzymywała 20,1 °C. Rozpiętość 26,4 °C w obrębie jednej sceny, pomiędzy wodą a kamienną rzeźbą oddaloną od niej o kilkadziesiąt centymetrów, pokazuje, że o temperaturze powierzchni decyduje nie lokalizacja, lecz rodzaj materiału i jego zdolność do odparowywania wody.



Rysunek 46. Termogram: rzeźbiarski zespół fontanny i tafla wody w niecce

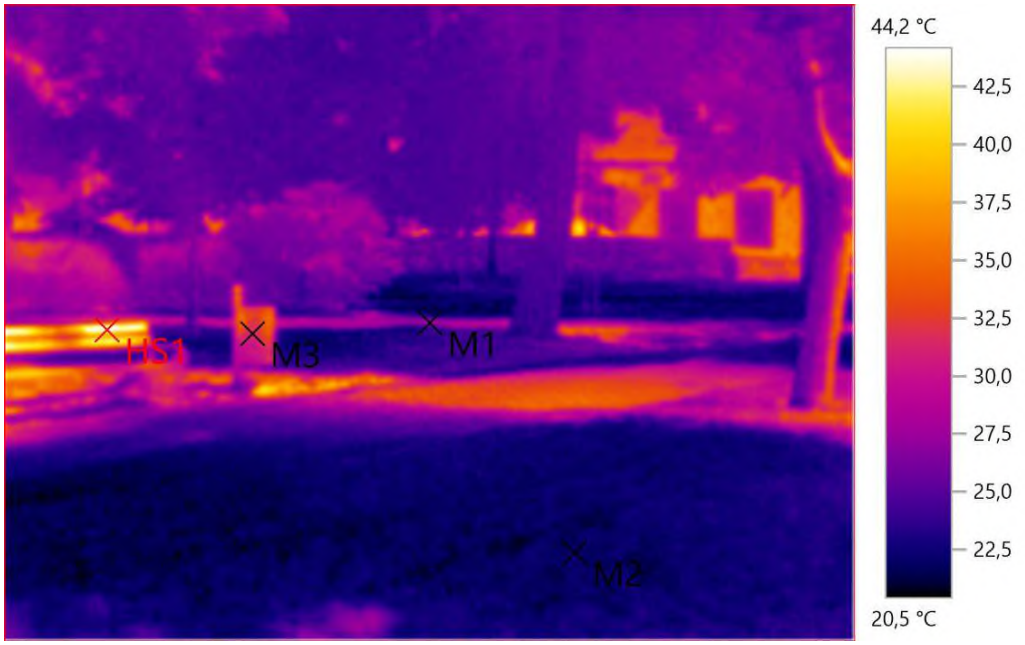


Rysunek 47. Fotografia sceny: rzeźbiarski zespół fontanny i tafla wody w niecce

Stanowisko 21 | zakres w kadrze 20,5–44,2 °C

Kadr obejmuje wnętrze parku przy placu gen. Władysława Sikorskiego: trawnik, zadrzewienie oraz alejkę spacerową o nawierzchni z kostki betonowej. Nasłoneczniony odcinek alejki wskazał 32,3 °C, przy maksimum kadru 44,2 °C odnotowanym na jej fragmencie o pełnej ekspozycji. Zieleń krzewiasta i niska w środkowej części kadru utrzymywała 23,8 °C, a zacieniony trawnik na pierwszym planie 21,9 °C. Różnica 22,3 °C pomiędzy trawnikiem w cieniu koron a odsłoniętą alejką, oddalonymi od siebie o kilka metrów, jest największym kontrastem odnotowanym w całych

badaniach terenowych i pokazuje, że połączenie powierzchni biologicznie czynnej z zacienieniem przez zieleń wysoką daje efekt nieporównywalnie silniejszy niż każdy z tych czynników osobno.



Rysunek 48. Termogram: wnętrze parku przy placu Sikorskiego: trawnik, zadrzewienie i alejka spacerowa



Rysunek 49. Fotografia sceny: wnętrze parku przy placu Sikorskiego: trawnik, zadrzewienie i alejka spacerowa

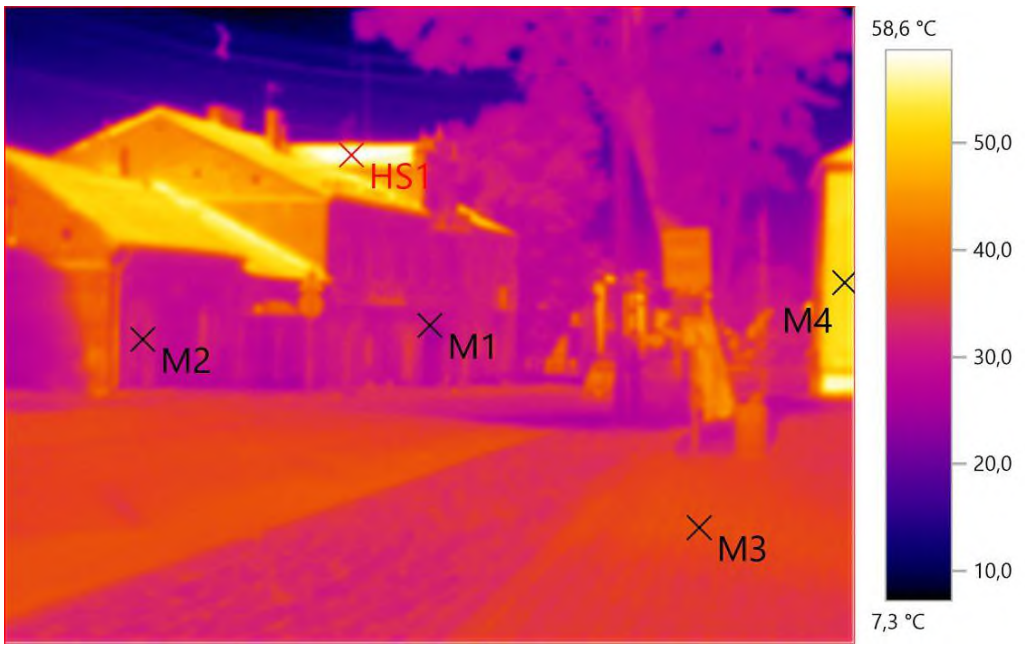
2.3.9. Sesja II: ciągi uliczne i pierzeje śródmieścia

Druga grupa sesji II obejmuje ulice śródmiejskie: historyczną pierzeję kamienic, główną oś handlową miasta oraz wąskie wnętrze uliczne o zwartej zabudowie. Pomiary wykonano w pełnym

słońcu, co pozwala ocenić zarówno nagrzewanie powierzchni odsłoniętych, jak i efekt wzajemnego zacienienia pierzei.

Stanowisko 22 | zakres w kadrze 7,3–58,6 °C

Ujęcie obejmuje ulicę śródmiejską z historyczną pierzeją kamienic, przystankiem komunikacji zbiorowej i szerokim chodnikiem z kostki betonowej. Najwyższą wartość odnotowaną na rozległej, rozpoznawalnej powierzchni w całych badaniach, 58,6 °C, zarejestrowano na połaci dachowej niskiej zabudowy w lewej części kadru, eksponowanej na promieniowanie słoneczne pod niewielkim kątem padania. Nasłoneczniona elewacja budynku po prawej stronie ulicy osiągnęła 51,5 °C, chodnik w pełnym słońcu 36,8 °C, elewacja kamienicy w głębi 31,4 °C, a jezdnia pozostająca częściowo w cieniu 29,8 °C. Zestawienie 58,6 °C na pokryciu dachowym z 29,8 °C na zacienionej jezdni daje rozpiętość 28,8 °C w obrębie jednego, kilkudziesięciometrowego odcinka ulicy.



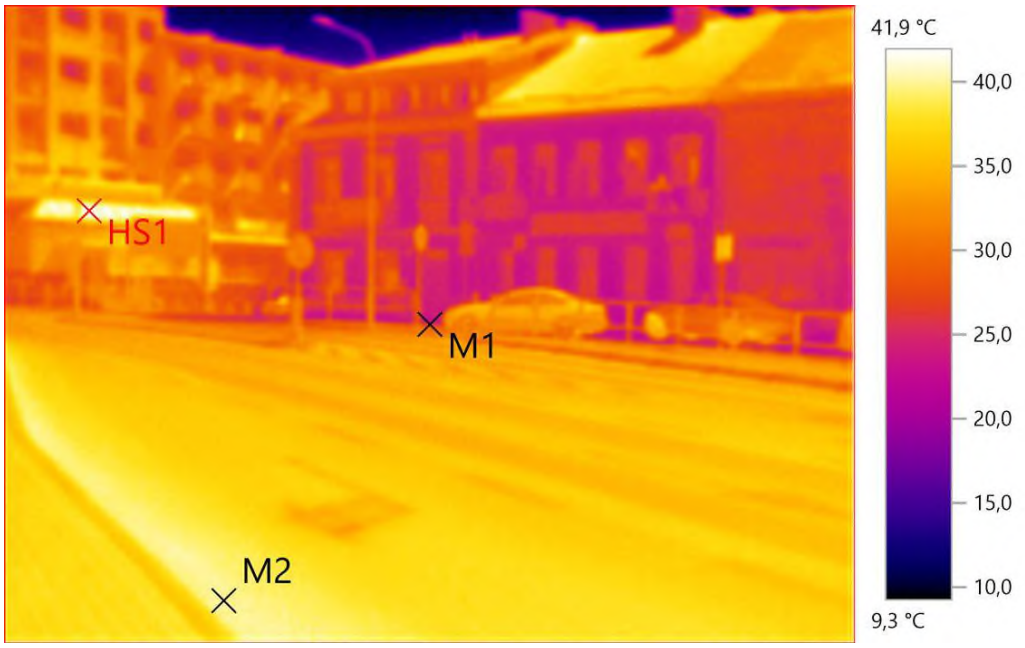
Rysunek 50. Termogram: ulica śródmiejska z historyczną pierzeją kamienic i chodnikiem z kostki betonowej



Rysunek 51. Fotografia sceny: ulica śródmiejska z historyczną pierzeją kamienic i chodnikiem z kostki betonowej

Stanowisko 23 | zakres w kadrze 9,3–41,9 °C

Kadr obejmuje główną ulicę śródmieścia wraz z pierzeją kamienic mieszczących lokale usługowe oraz szeroką jezdnię bitumiczną. Nawierzchnia jezdni na pierwszym planie wskazała 39,9 °C, przy maksimum kadru 41,9 °C zarejestrowanym w rejonie zabudowy po lewej stronie ujęcia. Elewacje kamienic, częściowo osłonięte własnym cieniem, utrzymywały 28,0 °C. Różnica 11,9 °C pomiędzy jezdnią a pierzeją pokazuje, że w tym typie wnętrza ulicznego to nawierzchnia drogowa, a nie zabudowa, pełni funkcję liniowego źródła ciepła o długości kilkuset metrów.



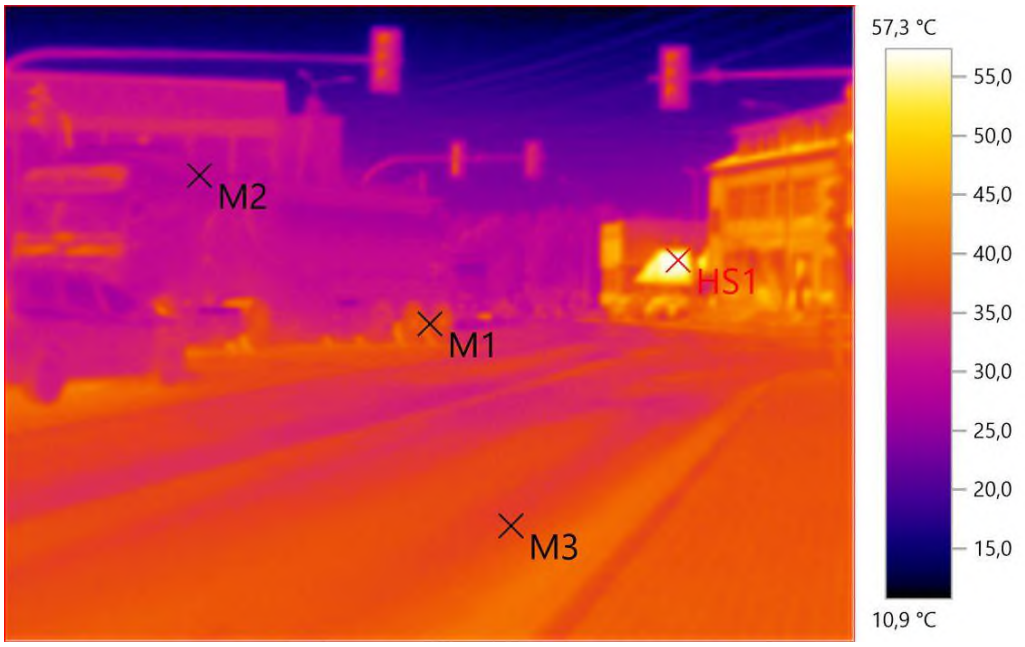
Rysunek 52. Termogram: główna ulica śródmieścia z pierzeją kamienic i szeroką jezdnią bitumiczną



Rysunek 53. Fotografia sceny: główna ulica śródmieścia z pierzeją kamienic i szeroką jezdnią bitumiczną

Stanowisko 24 | zakres w kadrze 10,9–57,3 °C

Ujęcie obejmuje skrzyżowanie z sygnalizacją świetlną w sąsiedztwie centrum handlowego, z szerokim, całkowicie odsłoniętym przekrojem jezdni. Nawierzchnia bitumiczna wskazała 37,4 °C w części środkowej i 36,7 °C na pierwszym planie, a elewacja obiektu handlowego 29,3 °C. Maksimum kadru, 57,3 °C, przypadło na silnie nagrzany, niewielki fragment zabudowy w głębi ujęcia; ze względu na jego rozmiar wartość tę należy traktować jako orientacyjną, a za miarodajny odczyt dla sceny przyjąć 37,4 °C zmierzone na jezdni. Skrzyżowania o tak szerokim, pozbawionym zadrzewienia przekroju są punktami kumulacji obciążenia termicznego dla pieszych oczekujących na przejście.



Rysunek 54. Termogram: skrzyżowanie z sygnalizacją świetlną w sąsiedztwie centrum handlowego



Rysunek 55. Fotografia sceny: skrzyżowanie z sygnalizacją świetlną w sąsiedztwie centrum handlowego

Stanowisko 25 | zakres w kadrze 7,6–70,6 °C

Kadr obejmuje wąską ulicę śródmiejską o zwartej, obustronnej pierzei, z przejściem dla pieszych na pierwszym planie. Nawierzchnia w strefie przejścia, wraz z oznakowaniem poziomym, wskazała 36,5 °C, natomiast jezdnia pozostająca w cieniu pierzei 32,7 °C. Najwyższą wartość w całych badaniach, 70,6 °C, zarejestrowano na przeszkleniu i nadwoziu samochodu zaparkowanego w pełnym słońcu; ze względu na bardzo małą powierzchnię obiektu oraz możliwy udział odbicia kierunkowego jest to odczyt orientacyjny, którego nie należy zestawiać z pomiarami

powierzchni budowlanych. Za miarodajny odczyt dla tej sceny przyjęto 36,5 °C. Ujęcie dokumentuje zarazem korzystne działanie wzajemnego zacienienia pierzei: fragment jezdni osłonięty zabudową był o 3,8 °C chłodniejszy od odcinka odsłoniętego.



Rysunek 56. Termogram: wąska ulica śródmiejska o zwartej pierzei z przejściem dla pieszych



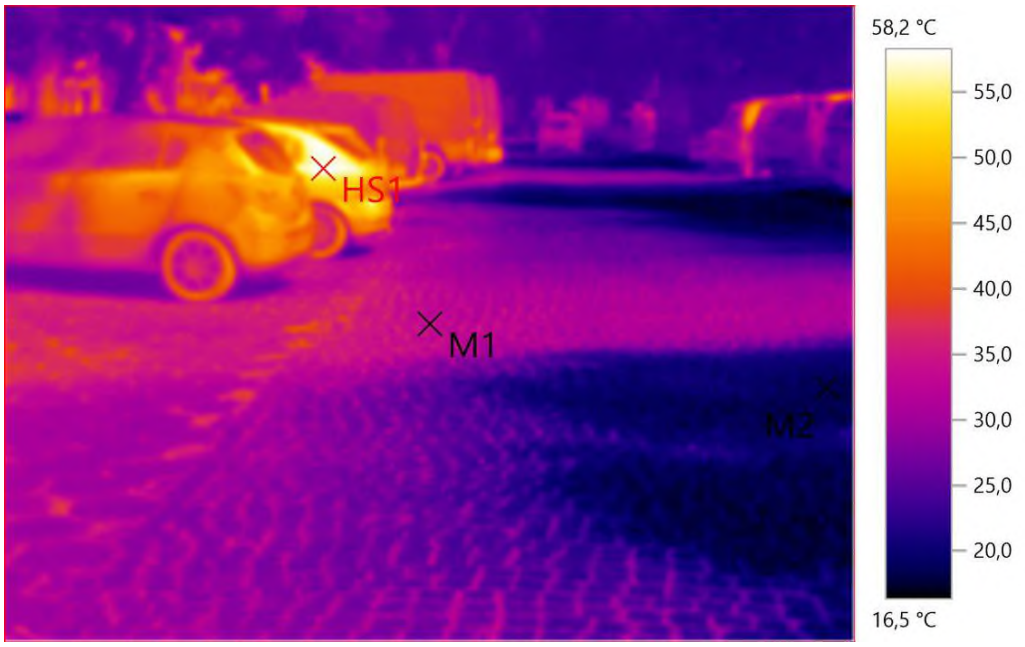
Rysunek 57. Fotografia sceny: wąska ulica śródmiejska o zwartej pierzei z przejściem dla pieszych

2.3.10. Sesja II: parkingi i nagrzewanie pojazdów

Trzecia grupa sesji II obejmuje parkingi śródmiejskie i osiedlowe. Miejsca postojowe pozbawione zadrzewienia łączą dwa mechanizmy nagrzewania: rozległą powierzchnię nieprzepuszczalną oraz gęstą sieć punktowych źródeł ciepła, jakie stanowią pozostawione na słońcu pojazdy.

Stanowisko 26 | zakres w kadrze 16,5–58,2 °C

Ujęcie obejmuje parking o nawierzchni z kostki kamiennej, w części osłonięty koronami starych drzew liściastych. Odsłonięty fragment nawierzchni wskazał 33,5 °C, natomiast jej fragment pozostający pod zwartym okapem koron 18,5 °C. Różnica 15,0 °C w obrębie jednej, jednorodnej nawierzchni, wynikająca wyłącznie z obecności zadrzewienia, należy do najmocniejszych argumentów za obsadzaniem miejsc postojowych drzewami o rozłożystej koronie. Maksimum kadru, 58,2 °C, odnotowano na nadwoziu pojazdu zaparkowanego poza zasięgiem cienia; pojazdy pozostawione bez zacienienia stają się punktowymi źródłami ciepła o temperaturze wyższej niż jakakolwiek zmierzona nawierzchnia.



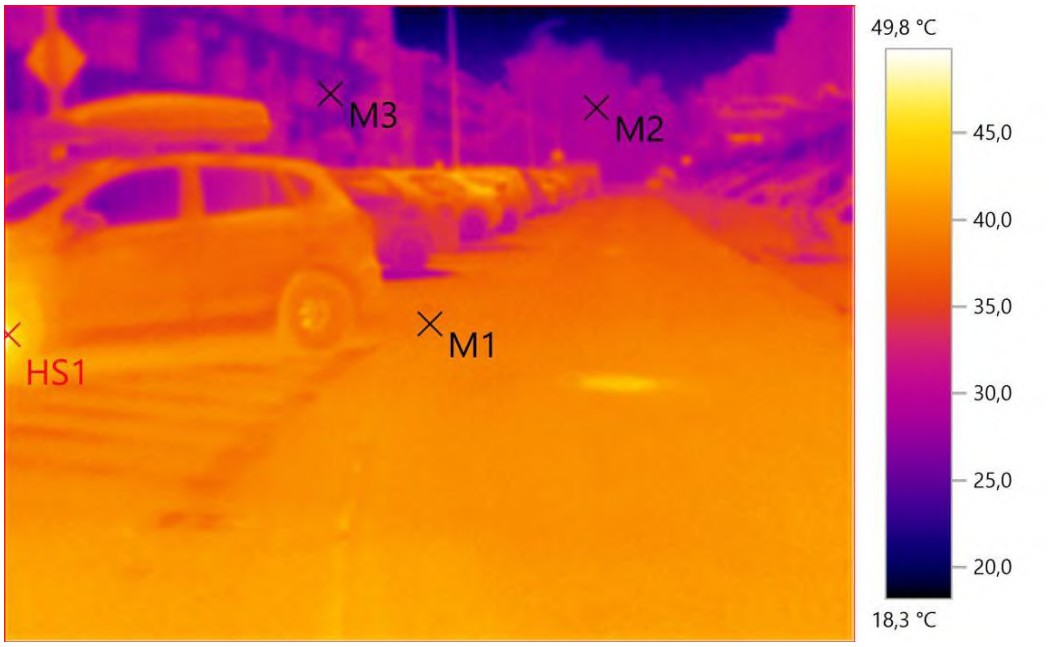
Rysunek 58. Termogram: parking o nawierzchni z kostki kamiennej częściowo osłonięty koronami starych drzew



Rysunek 59. Fotografia sceny: parking o nawierzchni z kostki kamiennej częściowo osłonięty koronami starych drzew

Stanowisko 27 | zakres w kadrze 18,3–49,8 °C

Kadr obejmuje jezdnię osiedlową przy ul. gen. Stefana Kosseckiego wraz z parkingiem przykrawężnikowym i zabudową wielorodzinną po obu stronach. Nawierzchnia bitumiczna osiągnęła 38,8 °C, elewacje budynków 28,1 °C, a zabudowa i zieleń zamykające perspektywę ulicy 29,2 °C. Maksimum kadru, 49,8 °C, przypadło na nadwozie ciemnego samochodu wyposażonego w bagażnik dachowy, zaparkowanego w pełnym słońcu. Różnica 10,7 °C pomiędzy jezdnią a elewacjami oraz kolejne 11,0 °C pomiędzy jezdnią a nadwoziem pojazdu pokazują, jak nakładają się na siebie powierzchniowe i punktowe źródła ciepła w przestrzeni osiedlowej.



Rysunek 60. Termogram: jezdnia osiedlowa przy ul. Kosseckiego z parkingiem

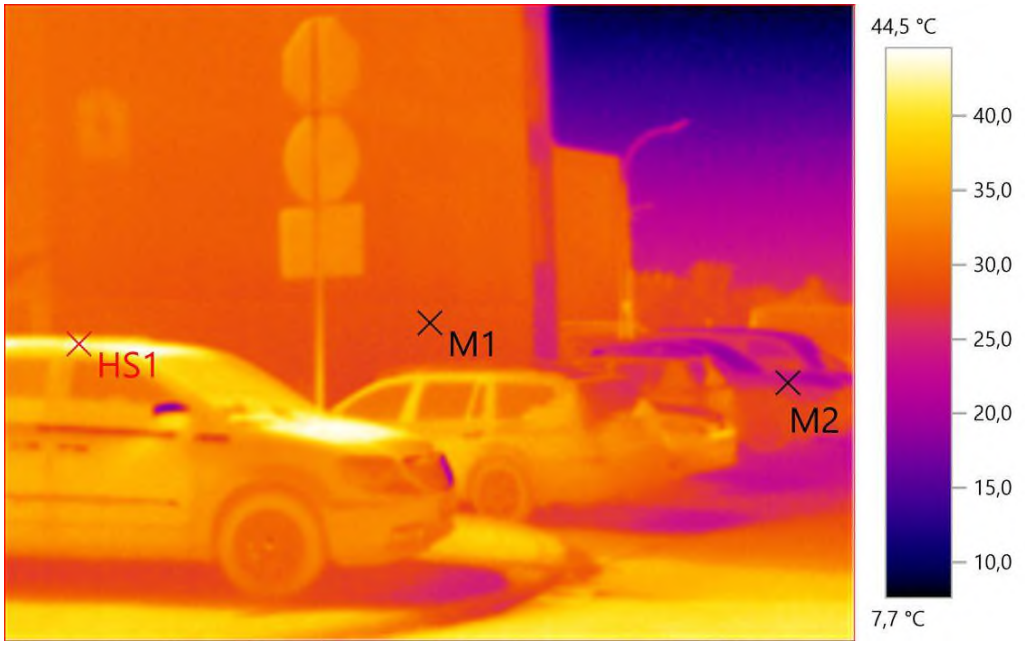


Rysunek 61. Fotografia sceny: jezdnia osiedlowa przy ul. Kosseckiego z parkingiem

Stanowisko 28 | zakres w kadrze 7,7–44,5 °C

Ujęcie dokumentuje parking przyblokowy przy ul. gen. Stefana Kosseckiego, zamknięty ścianą szczytową budynku wielorodzinnego. Nasłoneczniona ściana szczytowa wskazała 28,6 °C, a strefa zacieniona po prawej stronie kadru 25,5 °C. Maksimum kadru, 44,5 °C, odnotowano na nadwoziu pojazdu o ciemnoczerwonym lakierze, stojącego w pierwszym rzędzie miejsc postojowych. Szczelnie zastawiony pojazdami plac postojowy, pozbawiony jakiegokolwiek zadrzewienia, gromadzi ciepło jednocześnie w nawierzchni i w karoseriach, a różnica 15,9 °C pomiędzy

nadwoziem a ścianą budynku pokazuje, który z tych elementów decyduje o warunkach termicznych w strefie ruchu pieszego.



Rysunek 62. Termogram: parking przyblokowy przy ul. Kosseckiego zamknięty ścianą szczytową zabudowy



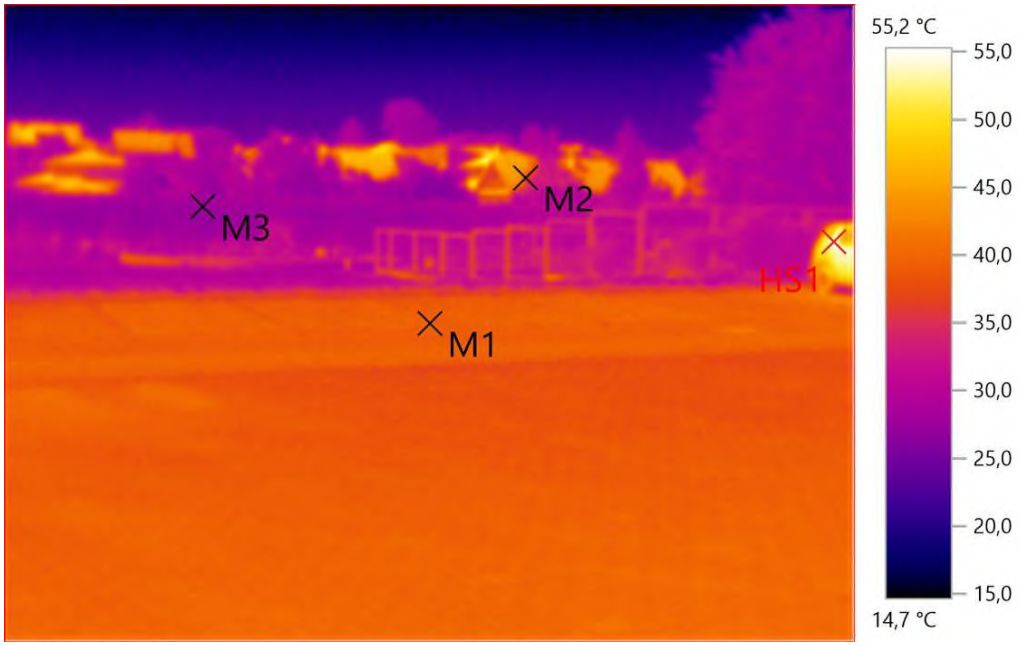
Rysunek 63. Fotografia sceny: parking przyblokowy przy ul. Kosseckiego zamknięty ścianą szczytową zabudowy

2.3.11. Sesja II: rozległe place utwardzone i jezdnie obrzeży śródmieścia

Ostatnia grupa obejmuje rozległe place utwardzone oraz jezdnie i place manewrowe na obrzeżach śródmieścia. Pomiary wykonane w pełnym słońcu pokazują skalę nagrzewania tych powierzchni w warunkach zbliżonych do dnia upalnego.

Stanowisko 29 | zakres w kadrze 14,7–55,2 °C

Kadr obejmuje rozległy plac utwardzony kostką betonową, zamknięty od południa pasem zieleni oraz ogrodzonym terenem rekreacyjnym z placem zabaw. Nawierzchnia placu wskazała 39,2 °C, połacie dachowe zabudowy jednorodzinnej w tle 38,0 °C, a zwarty pas zieleni wysokiej i żywopłotu oddzielający plac od terenu rekreacyjnego 27,6 °C. Maksimum kadru, 55,2 °C, zarejestrowano na nadwoziu pojazdu zaparkowanego przy krawędzi placu. Różnica 11,6 °C pomiędzy zielenią a nawierzchnią, przy bezpośrednim sąsiedztwie terenu użytkowanego przez dzieci, wskazuje ten obszar jako priorytetowy do wprowadzenia zacienienia.



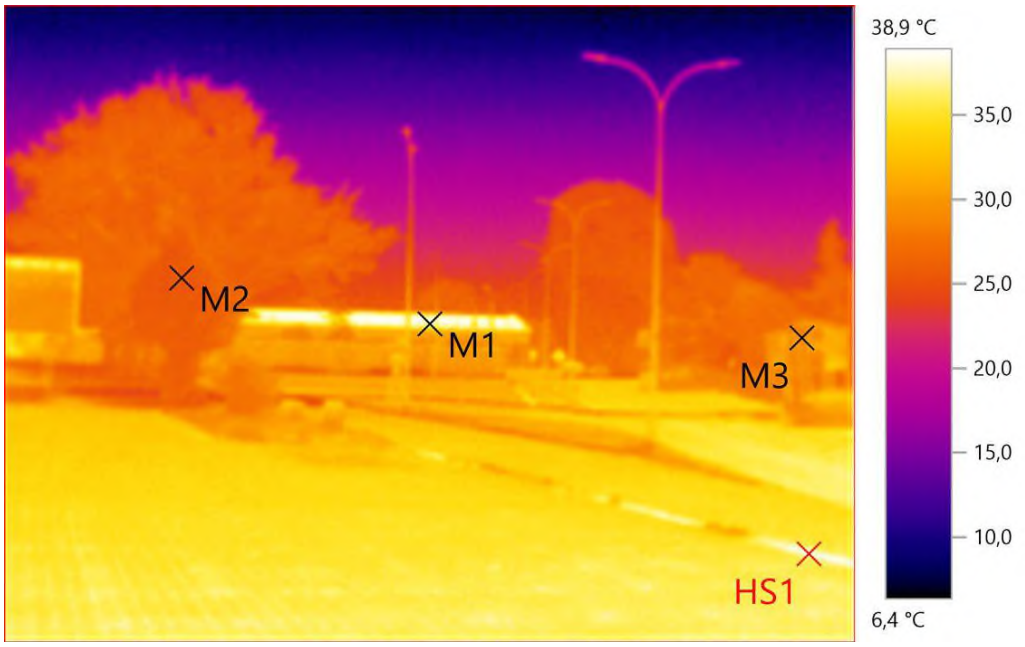
Rysunek 64. Termogram: rozległy plac utwardzony sąsiadujący z terenem rekreacyjnym i pasem zieleni



Rysunek 65. Fotografia sceny: rozległy plac utwardzony sąsiadujący z terenem rekreacyjnym i pasem zieleni

Stanowisko 30 | zakres w kadrze 6,4–38,9 °C

Ujęcie obejmuje rozległy plac utwardzony kostką betonową, ograniczony od północy szpalerem drzew i zabudową usługową. Nawierzchnia placu w dolnej części kadru osiągnęła maksimum ujęcia wynoszące 38,9 °C. Jasna, nasłoneczniona obudowa i ogrodzenie terenu w głębi kadru wskazały 34,0 °C, zieleń średnia i wysoka zamykająca plac 29,8 °C, a korona rozłożystego drzewa po lewej stronie 25,6 °C. Różnica 13,3 °C pomiędzy koroną drzewa a nawierzchnią placu pokazuje, że nawet pojedyncze, dojrzałe drzewo tworzy w swoim otoczeniu wyraźnie chłodniejszą enklawę w obrębie rozległej powierzchni utwardzonej.



Rysunek 66. Termogram: plac utwardzony ograniczony szpalerem drzew i zabudową usługową

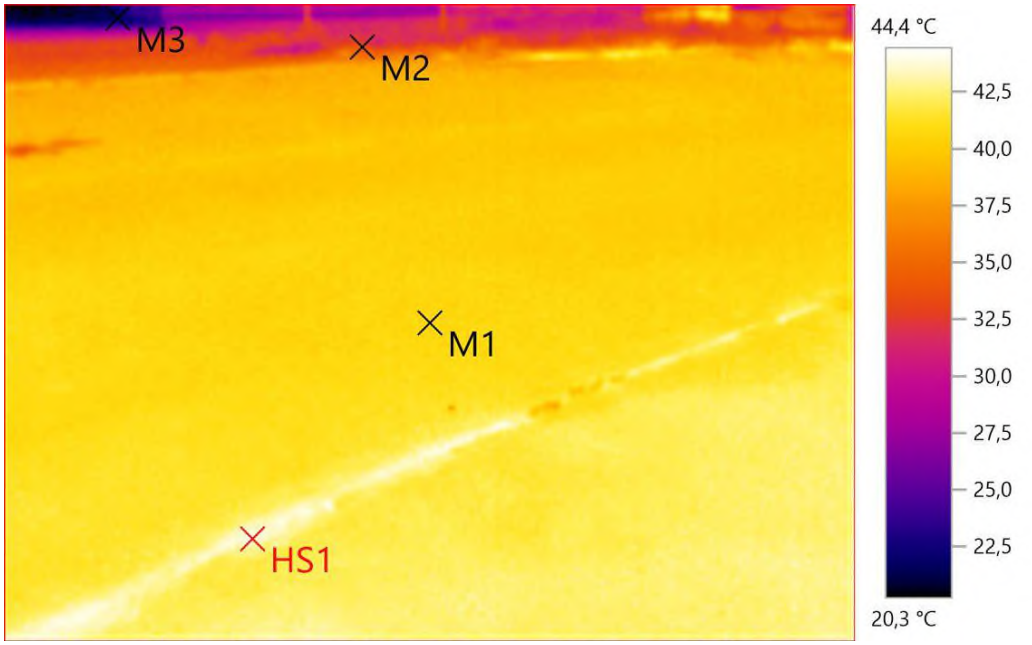


Rysunek 67. Fotografia sceny: plac utwardzony ograniczony szpalerem drzew i zabudową usługową

Stanowisko 31 | zakres w kadrze 20,3–44,4 °C

Ostatnie ujęcie badań obejmuje jezdnię i plac manewrowy w otoczeniu zabudowy usługowo-magazynowej. Nawierzchnia bitumiczna wskazała 40,7 °C, przy maksimum kadru 44,4 °C odnotowanym wzdłuż spękania wypełnionego masą bitumiczną, biegnącego przez całą szerokość jezdni. Zabudowa usługowa w głębi kadru osiągnęła 33,3 °C, a jej zacieniona partia 22,7 °C. Podwyższona o 3,7 °C temperatura wypełnienia spękania względem otaczającej nawierzchni wynika z niższego albedo i odmiennych właściwości cieplnych materiału naprawczego;

o nagrzewaniu decyduje zatem nie tylko rodzaj nawierzchni, lecz także jej stan techniczny oraz barwa zastosowanych uzupełnień.



Rysunek 68. Termogram: jezdnia i plac manewrowy w otoczeniu zabudowy usługowo-magazynowej



Rysunek 69. Fotografia sceny: jezdnia i plac manewrowy w otoczeniu zabudowy usługowo-magazynowej

2.3.12. Podsumowanie obserwacji terenowych

Obie sesje pomiarowe potwierdziły intensywne nagrzewanie powierzchni sztucznych w przestrzeni publicznej Zambrowa oraz wymierne, kompensacyjne oddziaływanie zieleni, zacienienia i wody. Najwyższą wartość w całym badaniu, 70,6 °C, zarejestrowano w sesji II jako

punktowe maksimum na przeszkleniu i nadwoziu samochodu zaparkowanego w pełnym słońcu we wnętrzu ulicy śródmiejskiej; ze względu na niewielką powierzchnię obiektu i możliwy udział odbicia kierunkowego wartość ta ma charakter orientacyjny. Najwyższym odczytem na rozległej, jednoznacznie rozpoznawalnej powierzchni pozostaje 58,6 °C, zmierzone na połaci dachowej niskiej zabudowy śródmiejskiej, i tę wartość przyjęto za miarodajną we wnioskach i rekomendacjach.

Wartości przekraczające 44 °C osiągnęły ponadto: nadwozia pojazdów pozostawionych bez zacienienia (44,5–58,2 °C), nasłonecznione elewacje we wnętrzach ulic śródmiejskich (51,5 °C), kamienne rzeźby fontanny eksponowane na pełne słońce (46,5 °C), alejka parkowa o nawierzchni z kostki betonowej (44,2 °C) oraz wypełnienie spękania w nawierzchni bitumicznej (44,4 °C). Odsłonięte nawierzchnie utwardzone mierzone w sesji II mieściły się w przedziale od 33,5 °C dla kostki kamiennej, przez 36,5–36,8 °C dla chodników w strefach przejść dla pieszych, po 36,7–40,7 °C dla jezdni bitumicznych i 38,9–40,5 °C dla placów i parkingów z kostki betonowej. W sesji I, wykonanej przy zachmurzeniu i w godzinach popołudniowych, te same kategorie powierzchni wskazywały odpowiednio 24,4–29,3 °C dla jezdni i 26,9–30,8 °C dla placów utwardzonych, pozostając mimo to najcieplejszymi elementami niemal każdego kadru.

Sesja II dostarczyła najczystszych dowodów na chłodzące działanie zieleni, cienia i wody. W kadrze obejmującym jednocześnie zacieniony trawnik i odsłoniętą alejkę parkową, przy odległości kilku metrów, różnica wyniosła 22,3 °C. W ujęciu obejmującym jedną, jednorodną nawierzchnię z kostki kamiennej, w części osłoniętą koronami starych drzew, różnica sięgnęła 15,0 °C. Tafla wody w niecce fontanny utrzymywała 20,1–22,0 °C wobec 40,5 °C na przylegającej nawierzchni z kostki betonowej oraz 46,5 °C na kamiennej rzeźbie, co daje rozpiętości odpowiednio 18,5 °C i 26,4 °C. Korony drzew w pełnym słońcu wskazywały 25,6–27,6 °C wobec 38,9–39,2 °C na sąsiadujących nawierzchniach placów.

W sesji I, mimo pełnego zachmurzenia i braku bezpośredniego nasłonecznienia, kontrasty pozostały czytelne. Trawniki i zieleń niska przylegające do nawierzchni utwardzonych utrzymywały 17,7–22,1 °C wobec 24,4–29,7 °C na kostce betonowej i nawierzchniach bitumicznych, co w obrębie pojedynczych kadrów odpowiada różnicom od 6,7 do 7,6 °C, a w ujęciu obejmującym plac utwardzony i przylegający do niego szpaler zieleni wysokiej sięga 10,1 °C. Korony drzew wskazywały 20,4–22,7 °C, a zacienione fragmenty nawierzchni były o 4,2 do 9,9 °C chłodniejsze od fragmentów odsłoniętych tej samej powierzchni. Osobną obserwacją sesji I jest udział ciepła antropogenicznego: pracująca jednostka zewnętrzna klimatyzacji na elewacji budynku użyteczności publicznej była o 4,3 °C cieplejsza od sąsiadującej z nią ściany.

Tabela 3. Zestawienie scen objętych terenowymi badaniami termowizyjnymi, sesja I (29 lipca 2026 r., godziny popołudniowe, ε = 0,95, temperatura odbita 20 °C)

Stanowisko	Opis sceny	Zakres w kadrze [°C]	Maksimum [°C]
1	Parking i pierzeja pawilonów parku handlowego przy ul. Białostockiej	11,2–34,1	34,1
2	Miejsca postojowe i jezdnia osiedlowa u zbiegu ul. Kosseckiego i ul. Pułaskiego	16,8–27,9	27,9

Stanowisko	Opis sceny	Zakres w kadrze [°C]	Maksimum [°C]
3	Parking przyblokowy przy ul. Kosseckiego wraz z przylegającym trawnikiem	14,8–33,4	33,4
4	Ciąg zabudowy wielorodzinnej przy ul. Pułaskiego i przyległa jezdnia	13,4–29,8	29,8
5	Skrzyżowanie dróg krajowych z przejściem dla pieszych i zielenią przyuliczną	15,5–29,7	29,7
6	Narożna zabudowa mieszkalno-usługowa kryta dachówką ceramiczną przy drodze krajowej	3,6–27,5	27,5
7	Ciąg uliczny i chodnik w sąsiedztwie Miejskiego Przedszkola nr 6 w Zambrowie	21,5–33,0	33,0
8	Plac utwardzony przed obiektem sakralnym, zamknięty szpalerem zieleni wysokiej	14,9–30,7	30,7
9	Budynek o ciemnym pokryciu dachowym z blachy przy placu utwardzonym	14,1–30,8	30,8
10	Elewacja budynku użyteczności publicznej z zespołem jednostek klimatyzacji	15,1–32,6	32,6
11	Miejsca postojowe przed budynkiem administracji publicznej i przyległa jezdnia	17,0–29,3	29,3
12	Ulica obsługująca tereny aktywności gospodarczej z chodnikiem i pasem trawnika	11,4–27,3	27,3
13	Skrzyżowanie z przejściem dla pieszych w otoczeniu zabudowy wielorodzinnej i zadrzewienia	16,8–28,6	28,6
14	Wewnętrzny plac postojowy zamknięty zabudową biurową i szpalerem drzew	-3,4–26,4	26,4
15	Parking przyblokowy osłonięty szpalerem starszych drzew liściastych	14,1–30,4	30,4
16	Rozległy plac utwardzony kostką betonową zamknięty szpalerem drzew	19,0–29,4	29,4
17	Zachodni fragment placu utwardzonego z wolnostojącymi tablicami reklamowymi	13,7–34,9	34,9
18	Zespół garaży o przegrodach z blachy stalowej przy drodze gruntowej	5,9–30,7	30,7

Źródło: opracowanie własne na podstawie plików wynikowych kamery termowizyjnej, 29 lipca 2026 r.

Tabela 4. Zestawienie scen objętych terenowymi badaniami termowizyjnymi, sesja II (30 lipca 2026 r., godziny przedpołudniowe, ε = 0,95, temperatura odbita 20 °C)

Stanowisko	Opis sceny	Zakres w kadrze [°C]	Maksimum [°C]
19	Fontanna z lwami na placu gen. Władysława Sikorskiego wraz z nawierzchnią placu	15,9–40,5	40,5
20	Rzeźbiarski zespół fontanny i tafla wody w niecce	17,0–46,5	46,5
21	Wnętrze parku przy placu Sikorskiego: trawnik, zadrzewienie i alejka spacerowa	20,5–44,2	44,2
22	Ulica śródmiejska z historyczną pierzeją kamienic i chodnikiem z kostki betonowej	7,3–58,6	58,6
23	Główna ulica śródmieścia z pierzeją kamienic i szeroką jezdnią bitumiczną	9,3–41,9	41,9
24	Skrzyżowanie z sygnalizacją świetlną w sąsiedztwie centrum handlowego	10,9–57,3	57,3
25	Wąska ulica śródmiejska o zwartej pierzei z przejściem dla pieszych	7,6–70,6	70,6
26	Parking o nawierzchni z kostki kamiennej częściowo osłonięty koronami starych drzew	16,5–58,2	58,2
27	Jezdnia osiedlowa przy ul. Kosseckiego z parkingiem przykrawężnikowym	18,3–49,8	49,8
28	Parking przyblokowy przy ul. Kosseckiego zamknięty ścianą szczytową zabudowy	7,7–44,5	44,5
29	Rozległy plac utwardzony sąsiadujący z terenem rekreacyjnym i pasem zieleni	14,7–55,2	55,2
30	Plac utwardzony ograniczony szpalerem drzew i zabudową usługową	6,4–38,9	38,9
31	Jezdnia i plac manewrowy w otoczeniu zabudowy usługowo-magazynowej	20,3–44,4	44,4

Źródło: opracowanie własne na podstawie plików wynikowych kamery termowizyjnej, 30 lipca 2026 r.

Tabela 5. Najwyższe odczyty temperatury powierzchni według typu powierzchni i obiektu

Typ powierzchni lub obiektu	Odczyt [°C]	Sesja
Przeszklenie i nadwozie pojazdu w pełnym słońcu (odczyt punktowy, orientacyjny)	70,6	II

Typ powierzchni lub obiektu	Odczyt [°C]	Sesja
Połać dachowa niskiej zabudowy śródmiejskiej w pełnym słońcu	58,6	II
Nadwozie pojazdu na parkingu pozbawionym zacienienia	44,5–58,2	II
Nasłoneczniona elewacja we wnętrzu ulicy śródmiejskiej	51,5	II
Kamienna rzeźba fontanny w pełnym słońcu	46,5	II
Wypełnienie spękania w nawierzchni bitumicznej	44,4	II
Alejka parkowa z kostki betonowej w pełnym słońcu	44,2	II
Jezdnia bitumiczna w pełnym słońcu	36,7–40,7	II
Plac i parking z kostki betonowej w pełnym słońcu	38,9–40,5	II
Połacie dachowe zabudowy jednorodzinnej w pełnym słońcu	38,0	II
Chodnik z kostki betonowej w strefie przejścia dla pieszych	36,5–36,8	II
Tablica reklamowa wielkoformatowa	34,9	I
Nawierzchnia z kostki kamiennej w pełnym słońcu	33,5	II
Blacha stalowa garażu w popołudniowym słońcu	29,8–30,7	I
Plac utwardzony kostką betonową (sesja popołudniowa)	26,9–30,8	I
Jezdnia bitumiczna (sesja popołudniowa)	24,4–29,3	I
Elewacja zabudowy wielorodzinnej w pełnym słońcu	28,1–28,6	II
Jednostka zewnętrzna klimatyzacji na elewacji	27,4	I
Korony drzew i zieleń wysoka w pełnym słońcu	25,6–27,6	II
Połać dachowa z dachówki ceramicznej (sesja popołudniowa)	25,4	I
Zieleń wysoka i trawniki (sesja popołudniowa)	17,7–22,7	I
Zacieniony trawnik parkowy	21,9	II
Tafla wody w niecce fontanny	20,1–22,0	II
Nawierzchnia utwardzona w cieniu koron drzew	18,5	II

Źródło: opracowanie własne na podstawie terenowych badań termowizyjnych.

3. Konkluzja

Przeprowadzone badania potwierdzają występowanie powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła na obszarze Zambrowa. Podstawę sformułowanych wniosków stanowią dwa niezależne rozpoznania: analiza rozkładu temperatury powierzchni czynnej wykonana na czternastu scenach satelitarnych Landsat 8 i Landsat 9 z lat 2021–2026 oraz terenowe pomiary termowizyjne z 29 i 30 lipca 2026 r., obejmujące 31 stanowisk. Analiza przestrzenna wyznacza zasięg zjawiska i klasy jego natężenia, natomiast pomiary terenowe wskazują typy powierzchni i materiałów odpowiedzialne za nagrzewanie, dzięki czemu obie metody wzajemnie się uzupełniają i prowadzą do zbieżnych wniosków.

Zsyntetyzowane wyniki odpowiadają klasycznemu ciągowi przyczynowo-skutkowemu powstawania miejskiej wyspy ciepła: wysoki udział powierzchni o dużej pojemności cieplnej i znikomej zdolności do parowania prowadzi do intensywnej absorpcji promieniowania słonecznego w porze dziennej, magazynowania energii w materiałach budowlanych i jej stopniowego oddawania po zachodzie słońca, co podnosi temperaturę w tkance miejskiej względem terenów otwartych i zadrzewionych. Zależność tę potwierdziły pomiary w obu sesjach: w obrębie pojedynczych kadrów powierzchnie odsłonięte osiągały temperatury od kilku do ponad dwudziestu stopni wyższe niż sąsiadujące z nimi powierzchnie zacienione, porośnięte roślinnością lub pokryte wodą.

Na uwarunkowania te nakłada się specyfika Zambrowa: skrajnie niska lesistość w granicach administracyjnych, wynosząca 1,0 %, niewielki udział terenów zieleni urządzonej, wynoszący ok. 1,8 % powierzchni miasta, oraz układ przestrzenny rozciągnięty wzdłuż osi dróg krajowych nr 63 i nr 66, w którym rozległe place utwardzone, parkingi przyblokowe i tereny aktywności gospodarczej zajmują znaczną część tkanki miejskiej. Rekompensatę stanowią dolina Jabłonki wraz z zalewem miejskim, park przy placu gen. Władysława Sikorskiego, kompleks zieleni nad zalewem oraz otaczające miasto tereny rolne i kompleks leśny Czerwonego Boru, tworzące rezerwuar chłodu i korytarze dopływu chłodniejszego powietrza z terenów pozamiejskich.

3.1. Wpływ powierzchni antropogenicznych

Analiza pokrycia terenu wykazała, że powierzchnie antropogeniczne zajmują 14,3 % obszaru miasta, tworząc zwarty, południkowo wydłużony pas, którego granice niemal dokładnie pokrywają się z wyznaczonym niezależnie zasięgiem powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła. Zbieżność ta jest najmocniejszym argumentem za bezpośrednim związkiem pomiędzy udziałem powierzchni nieprzepuszczalnych a nagrzewaniem tkanki miejskiej: pole o najwyższej średniej temperaturze powierzchni, sięgającej 46,1 °C, pokrywa się z terenami o największej koncentracji dachów, placów manewrowych i nawierzchni utwardzonych w południowej części miasta.

Pomiary terenowe potwierdziły ten mechanizm w skali pojedynczych obiektów. Wszystkie zmierzone powierzchnie nieprzepuszczalne, niezależnie od materiału, okazały się cieplejsze od sąsiadujących z nimi powierzchni biologicznie czynnych, a różnice mieściły się w przedziale od 6,6 do 22,3 °C. Najsilniej nagrzewały się pokrycia dachowe, nawierzchnie bitumiczne oraz nawierzchnie z kostki betonowej, a więc trzy typy powierzchni dominujące w strukturze przestrzennej miasta. Jednocześnie badania wskazały elementy pomijane w typowej inwentaryzacji uszczelnienia, które również pełnią funkcję źródeł ciepła: wielkoformatowe nośniki reklamowe, blaszane przegrody garaży, jednostki zewnętrzne klimatyzacji oraz pojazdy pozostawione bez zacienienia.

Odrębnym problemem jest niedobór zieleni wysokiej w obrębie powierzchni utwardzonych. Przy średnim zagęszczeniu 21 drzew na hektar w skali całego miasta (Załącznik II, rys. 3), rdzeń śródmieścia, place postojowe i tereny aktywności gospodarczej pozostają niemal bezdrzewne, podczas gdy właśnie tam pomiary wykazały najwyższe temperatury powierzchni. Poza zasięgiem dojścia do jakiegokolwiek miejsca chłodu lub obszaru zieleni dającej cień pozostaje 51,3 % powierzchni miasta i 305 budynków mieszkalnych, co odpowiada 17,1 % ich ogólnej liczby.

3.2. Identyfikacja obszarów problemowych

Na podstawie wyników analizy przestrzennej oraz terenowych badań termowizyjnych wyodrębniono kategorie przestrzeni miejskich najsilniej narażonych na nasilenie miejskiej wyspy ciepła w Zambrowie. Do obszarów problemowych należą:

- **Tereny aktywności gospodarczej i zabudowy poprzemysłowej w południowej części miasta:** jedyny w Zambrowie obszar zaliczony do klasy ekstremalnie wysokiej wskaźnika UHIER, w którym średnia wieloletnia temperatura powierzchni osiąga 46,1 °C, a w dniu upalnym 48,7 °C. Decydują o tym rozległe powierzchnie dachowe, place manewrowe i drogi wewnętrzne przy niemal całkowitym braku zieleni wysokiej.
- **Rdzeń śródmieścia wraz z ciągami dróg krajowych nr 63 i nr 66:** zwarte pole klasy wysokiej wskaźnika UHIER, potwierdzone pomiarami terenowymi. Nawierzchnie bitumiczne osiągały tu 36,7–40,7 °C, chodniki w strefach przejść dla pieszych 36,5–36,8 °C, nasłonecznione elewacje 51,5 °C, a połacie dachowe niskiej zabudowy 58,6 °C.
- **Osiedla zabudowy wielorodzinnej wraz z parkingami przyblokowymi:** drugie pod względem powierzchni pole klasy wysokiej, obejmujące zespoły przy ul. gen. Stefana Kosseckiego i ul. Kazimierza Pułaskiego. Nawierzchnie parkingów i ciągów pieszo-jezdnych osiągały 28,8 °C w sesji popołudniowej, przy trawniku zmierzonym w tym samym kadrze utrzymującym 21,2 °C, natomiast w sesji przedpołudniowej jezdnia osiedlowa wskazała 38,8 °C wobec 28,1 °C na elewacjach zabudowy. Różnica 7,6 °C pomiędzy nawierzchnią a przylegającym do niej trawnikiem występuje na dystansie kilku metrów, co czyni osiedla obszarem o największym potencjale poprawy przy stosunkowo niewielkich nakładach.
- **Rozległe place utwardzone i parkingi obiektów handlowych:** największe jednorodne powierzchnie nieprzepuszczalne w mieście, pozbawione wewnętrznego zadrzewienia. Nawierzchnie osiągały 38,9–40,5 °C w pełnym słońcu, a ich całkowita jednorodność termiczna oznacza brak jakiegokolwiek zróżnicowania mikroklimatycznego na powierzchni rzędu kilku hektarów.
- **Miejsca postojowe pozbawione zacienienia:** nadwozia pojazdów eksponowanych na słońce osiągały 44,5–58,2 °C, a punktowo, na przeszkleniach, 70,6 °C, a więc temperatury wyższe od wszystkich zmierzonych nawierzchni. Parkingi bez drzew łączą zatem rozległe źródło powierzchniowe z gęstą siecią źródeł punktowych.
- **Otoczenie placówek oświatowych i opiekuńczych:** pomiary przy Miejskim Przedszkolu nr 6 w Zambrowie wykazały 30,6 °C na chodniku i 28,8 °C na jezdni już w warunkach pełnego zachmurzenia, a plac utwardzony sąsiadujący z terenem rekreacyjnym z placem zabaw osiągnął w pełnym słońcu 39,2 °C przy zieleni w sąsiedztwie utrzymującej 27,6 °C. Są to przestrzenie użytkowane codziennie przez grupę o najwyższej wrażliwości na stres cieplny.

- **Strefy oczekiwania pieszych przed przejściami i przystanki:** nawierzchnie w strefach przejść dla pieszych osiągały 36,5–36,8 °C, a więc wartości zbliżone do jezdni, przy jednoczesnym braku zacienienia. Obciążenie kumuluje się dokładnie tam, gdzie użytkownik przestrzeni pozostaje nieruchomo przez kilkadziesiąt sekund.
- **Reprezentacyjne place i wnętrza kwartałów zabudowy:** plac przed obiektem sakralnym nagrzewał się do 30,7 °C w warunkach zachmurzenia, o 10,1 °C powyżej przylegającej zieleni wysokiej, a zamknięte z dwóch stron wnętrza kwartałów o nawierzchni w całości utwardzonej działają jak pułapki termiczne o ograniczonym polu widzenia nieba.

Jednocześnie badania wskazały przestrzenie, w których zjawisko jest skutecznie łagodzone: strefę oddziaływania fontanny na placu gen. Władysława Sikorskiego (tafla wody 20,1–22,0 °C przy nawierzchni nagrzanej do 40,5 °C), wnętrze parku przy tym placu (zacieniony trawnik 21,9 °C wobec 44,2 °C na odsłoniętej alejce), parkingi osłonięte koronami starych drzew (18,5 °C wobec 33,5 °C na odsłoniętym fragmencie tej samej nawierzchni), zachowane trawniki i skarpy trawiaste na osiedlach oraz zadrzewienia przyuliczne. Kontrast ten wyznacza kierunek działań adaptacyjnych: priorytetem jest wprowadzanie zacienienia, zieleni wysokiej o systemie gruntowym oraz rozwiązań wodnych dokładnie w tych obszarach, które zidentyfikowano jako problemowe.

W ujęciu okołomiejskim najniższych klas natężenia zjawiska należy oczekiwać w dolinie Jabłonki wraz z zalewem miejskim, na terenach rolnych i otwartych we wschodniej oraz południowo-wschodniej części gminy, a także w sąsiadującym z miastem kompleksie leśnym Czerwonego Boru. To one tworzą chłodne tło termiczne i zaplecze przewietrzające miasto, a ich zachowanie w stanie niezabudowanym jest warunkiem utrzymania obecnego, i tak ograniczonego, potencjału chłodzenia Zambrowa.

3.3. Sposoby przeciwdziałania zjawisku miejskiej wyspy ciepła

Ograniczanie miejskiej wyspy ciepła opiera się przede wszystkim na rozwoju błękitno-zielonej infrastruktury oraz na konsekwentnym uwzględnianiu wymogów adaptacyjnych w planowaniu przestrzennym. Do najważniejszych kierunków działań w warunkach Zambrowa należą:

- **Zwiększanie powierzchni terenów zieleni:** wzmacnianie i domykanie istniejącej sieci terenów zieleni miasta, którą tworzą przede wszystkim park przy placu gen. Władysława Sikorskiego, kompleks zieleni nad zalewem miejskim oraz zieleń osiedlowa, a także tworzenie parków kieszonkowych i skwerów w kwartałach pozbawionych dostępu do zieleni w promieniu dojścia pieszego. Przy lesistości na poziomie 1,0 % i udziale terenów zieleni urządzonej ok. 1,8 % jest to dla Zambrowa działanie o znaczeniu podstawowym.
- **Nasadzenia drzew w miejscach o największym obciążeniu termicznym:** zieleń wysoka pozostaje najskuteczniejszym pojedynczym narzędziem łagodzenia zjawiska. Pomiary wykazały, że nawierzchnia osłonięta koronami drzew jest o 15,0 °C chłodniejsza od odsłoniętego fragmentu tej samej nawierzchni, a korony drzew w pełnym słońcu utrzymują temperaturę o 11,6–13,3 °C niższą od sąsiadujących powierzchni utwardzonych. Priorytetem powinno być zacienianie parkingów przyblokowych i placów postojowych obiektów handlowych, rozległych placów utwardzonych, otoczenia placówek oświatowych, stref oczekiwania przed przejściami dla pieszych, przystanków komunikacji oraz ciągów pieszych wzdłuż dróg krajowych nr 63 i nr 66.

- **Rozszczelnianie i ograniczanie powierzchni nieprzepuszczalnych:** zastępowanie zbędnych nawierzchni bitumicznych i betonowych nawierzchniami przepuszczalnymi lub półprzepuszczalnymi, w szczególności na parkingach przyblokowych, placach manewrowych oraz na rozległych placach utwardzonych. Pomiary dostarczyły bezpośredniego uzasadnienia dla tego kierunku: trawnik przylegający do nawierzchni z kostki betonowej, przy identycznym nasłonecznieniu, pozostawał chłodniejszy o 7,6 °C, a zwarty pas zieleni wysokiej przylegający do placu utwardzonego o 11,6 °C. Rozwiązanie to jednocześnie zwiększa retencję wód opadowych, umożliwia ewapotranspirację i ogranicza akumulację ciepła.
- **Ochrona istniejących trawników, skarp trawiastych i zadrzewień osiedlowych:** w skali osiedli największą wartością adaptacyjną są powierzchnie już istniejące. Każdy metr kwadratowy trawnika zamieniony na miejsce postojowe oznacza, zgodnie z pomiarami, lokalny wzrost temperatury powierzchni o 7,6 do 11,6 °C. Ochrona tych terenów w planach miejscowych jest tańsza i szybciej skuteczna niż odtwarzanie zieleni po jej likwidacji.
- **Dobór materiałów o wysokim albedo i dbałość o stan techniczny nawierzchni:** pomiary wykazały, że wypełnienie spękania w nawierzchni bitumicznej było o 3,7 °C cieplejsze od otaczającej jezdni, a ciemne przegrody blaszane i wielkoformatowe nośniki reklamowe nagrzewały się silniej niż rozległe nawierzchnie. Przy projektowaniu powierzchni utwardzonych należy zwracać uwagę nie tylko na materiał podstawowy, ale i na barwę obrzeży, wypełnień oraz elementów wyposażenia.
- **Zielone dachy, ściany i pokrycia o wysokim albedo:** pokrycia dachowe okazały się najsilniej nagrzewającym się rozległym elementem tkanki miejskiej Zambrowa, osiągając 58,6 °C w śródmieściu i 38,0 °C na zabudowie jednorodzinnej. W zabudowie o ograniczonych możliwościach wprowadzenia zieleni gruntowej należy rozważyć zielone dachy, pnącza na elewacjach oraz jasne, wysoko odbiciowe pokrycia, z zachowaniem wymogów ochrony konserwatorskiej w obrębie historycznej zabudowy śródmiejskiej.
- **Ochrona i udrożnienie korytarzy przewietrzania:** zachowanie drożności doliny Jabłonki wraz z zalewem miejskim jako naturalnego kanału dopływu chłodniejszego powietrza, rozdzielającego zarazem dwa główne pola miejskiej wyspy ciepła, oraz ochrona powiązań przyrodniczych łączących miasto z terenami otwartymi i z kompleksem leśnym Czerwonego Boru. W praktyce planistycznej oznacza to utrzymanie zakazu zabudowy terenów nadrzecznych oraz zachowanie ciągłości klinów zieleni.
- **Rozwój rozwiązań wodnych w przestrzeni publicznej:** rozbudowa fontann, kurtyn wodnych, poidełek i zdrojów. Wykonane pomiary potwierdziły, że tafla wody fontanny na placu gen. Władysława Sikorskiego pozostaje o 18,5 °C chłodniejsza od przylegającej nawierzchni, co czyni ją najskuteczniejszym zrealizowanym elementem adaptacyjnym w mieście. Zasięg oddziaływania rozwiązań wodnych pozostaje jednak lokalny i powinny one uzupełniać, a nie zastępować zacienienie i zieleń.
- **Zwiększanie dostępności miejsc chłodu:** ponad połowa powierzchni miasta i 305 budynków mieszkalnych pozostaje poza zasięgiem dojścia pieszego do miejsca chłodu lub obszaru zieleni dającej cień. Uzupełnienie sieci wymaga zarówno wyznaczenia i oznakowania nowych punktów w istniejących obiektach publicznych, jak i wprowadzenia zacienionych miejsc odpoczynku, poidełek i zdrojów wzdłuż głównych ciągów pieszych.

- **Planowanie przestrzenne i regulacje lokalne:** uwzględnianie wymogów adaptacyjnych w planie ogólnym i miejscowych planach zagospodarowania przestrzennego, w szczególności przez ustalanie minimalnego udziału powierzchni biologicznie czynnej, wprowadzanie wymogu zacienienia miejsc postojowych oraz ograniczanie stosowania ciemnych, nieprzepuszczalnych nawierzchni na dużych powierzchniach, zwłaszcza na terenach aktywności gospodarczej.
- **Edukacja i działania informacyjne:** kampanie dotyczące zachowań w czasie fal upałów, korzyści z zazieleniania posesji, podwórek i otoczenia budynków wielorodzinnych oraz z ograniczania betonowania przestrzeni prywatnych.

3.4. Rola zieleni i wody jako czynników łagodzących

Terenowe pomiary termowizyjne wykonane w Zambrowie dostarczyły ilościowych, powtarzalnych dowodów na kompensacyjne oddziaływanie błękitno-zielonej infrastruktury. We wszystkich badanych lokalizacjach powierzchnie pozostające w zasięgu koron drzew, w cieniu zabudowy lub w strefie oddziaływania wody charakteryzowały się temperaturami istotnie niższymi niż analogiczne powierzchnie odsłonięte. Najwyraźniejsze kontrasty udokumentowano dla:

- **zieleni wysokiej zacieniającej powierzchnie utwardzone:** nawierzchnia z kostki kamiennej pozostająca pod zwartym okapem koron utrzymywała 18,5 °C wobec 33,5 °C na odsłoniętym fragmencie tej samej nawierzchni, co daje różnicę 15,0 °C wynikającą wyłącznie z obecności zadrzewienia;
- **powierzchni biologicznie czynnej w cieniu koron:** zacieniony trawnik parkowy wskazał 21,9 °C przy 44,2 °C na odsłoniętej alejce z kostki betonowej oddalonej o kilka metrów, czyli 22,3 °C różnicy, co stanowi największy kontrast odnotowany w całych badaniach;
- **wody otwartej:** tafla wody w niecce fontanny utrzymywała 20,1–22,0 °C, podczas gdy przylegająca nawierzchnia z kostki betonowej osiągała 40,5 °C, a kamienne rzeźby fontanny 46,5 °C; różnice wynoszą odpowiednio 18,5 °C i 26,4 °C na dystansie kilku metrów i przy identycznym nasłonecznieniu;
- **koron drzew w pełnym słońcu:** korony i zwarte pasy zieleni wysokiej wskazywały 25,6–27,6 °C wobec 38,9–39,2 °C na sąsiadujących nawierzchniach placów utwardzonych, co odpowiada różnicom 11,6–13,3 °C;
- **trawników przy nawierzchniach utwardzonych:** w sesji popołudniowej, w kadrach obejmujących jednocześnie obie powierzchnie, trawa i zieleń niska utrzymywały 17,7–22,1 °C wobec 24,4–29,7 °C na nawierzchni, czyli o 6,7 do 7,6 °C mniej w obrębie tego samego kadru;
- **zacienienia przez zabudowę:** nawierzchnia parkingu osłonięta cieniem budynku wskazała 19,4 °C przy 29,3 °C na odsłoniętej jezdni oddalonej o kilkanaście metrów, a jezdnia we wnętrzu wąskiej ulicy śródmiejskiej była o 3,8 °C chłodniejsza od odcinka odsłoniętego.

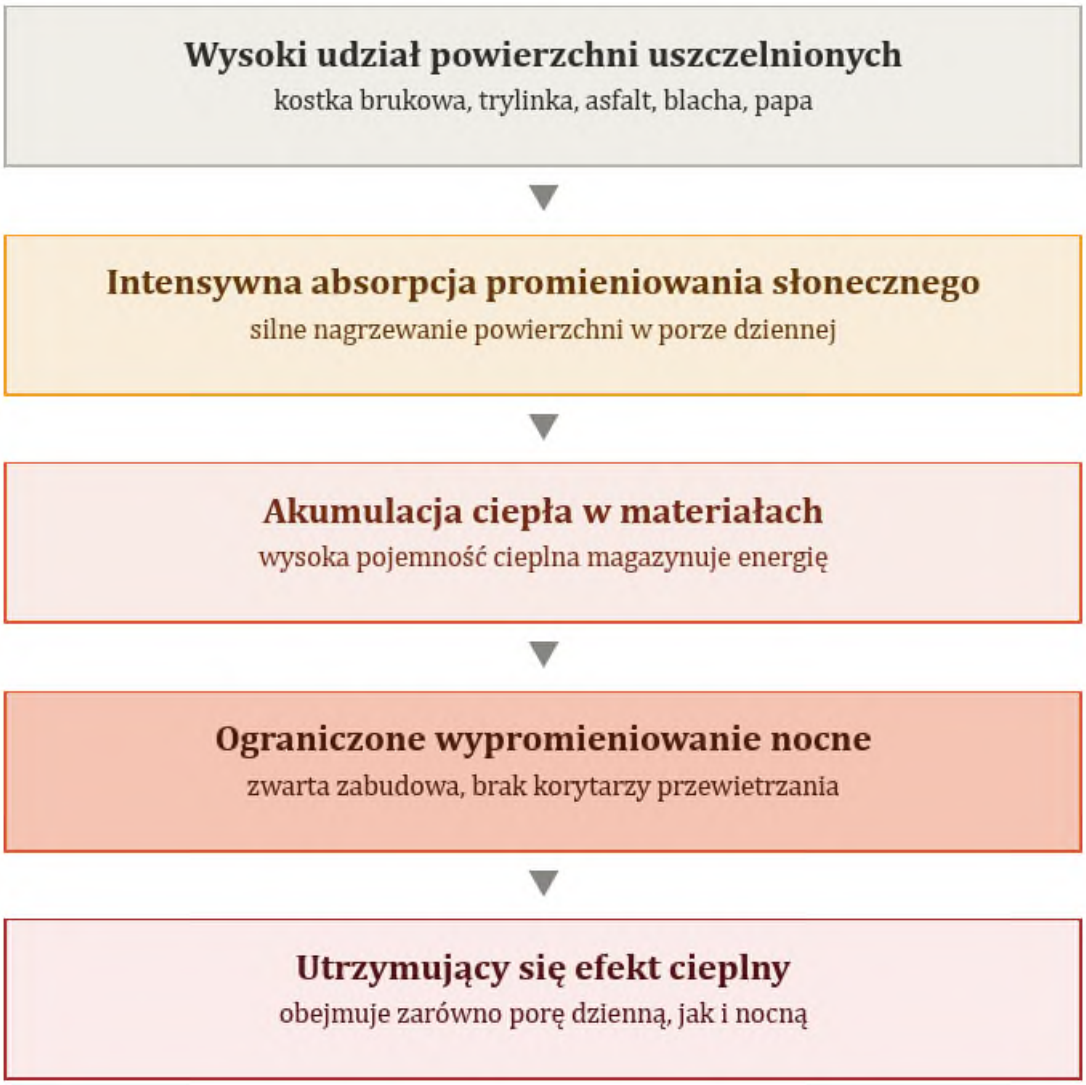
Zestawienie tych obserwacji dowodzi, że woda otwarta, zieleń wysoka, powierzchnia biologicznie czynna oraz zacienienie stanowią najskuteczniejsze narzędzia łagodzenia miejskiej wyspy ciepła w skali lokalnej; udokumentowane różnice temperatury powierzchni mieściły się w przedziale od

3,8 do 26,4 °C. Szczególne znaczenie dla termicznej stabilizacji Zambrowa mają dolina Jabłonki wraz z zalewem miejskim i kompleksem zieleni nad zalewem, park przy placu gen. Władysława Sikorskiego oraz otaczające miasto tereny otwarte i kompleks leśny Czerwonego Boru. Konsekwentne wprowadzanie zieleni wysokiej o systemie gruntowym, rozszczelnianie nawierzchni oraz rozwój rozwiązań wodnych w rejonach zidentyfikowanych jako problemowe pozwolą wymiernie poprawić komfort termiczny mieszkańców.

4. Wnioski końcowe i rekomendacja

Zjawisko miejskiej wyspy ciepła w Zambrowie ma charakter wyraźnie zróżnicowany przestrzennie i dwudzielny. Analiza rozkładu temperatury powierzchni czynnej oraz terenowe pomiary termowizyjne z 29 i 30 lipca 2026 r., obejmujące 31 stanowisk, wskazują na silne nagrzewanie powierzchni sztucznych w dwóch zwartych polach: w rdzeniu śródmieścia wraz z osiedlami zabudowy wielorodzinnej na północ od doliny Jabłonki oraz na terenach aktywności gospodarczej i zabudowy poprzemysłowej na południe od rzeki. Rejony te kontrastują z chłodnym tłem termicznym tworzonym przez dolinę Jabłonki z zalewem miejskim, park przy placu gen. Władysława Sikorskiego, tereny otwarte i rolne w granicach miasta oraz przylegający do Zambrowa kompleks leśny Czerwonego Boru.

Mechanizm powstawania zjawiska odpowiada klasycznemu ciągowi przyczynowo skutkowemu:



Terenowe pomiary dostarczyły empirycznego potwierdzenia mechanizmu powstawania zjawiska. Powierzchnie odsłonięte i eksponowane na promieniowanie słoneczne osiągały temperatury skrajnie wysokie: do 58,6 °C w przypadku połaci dachowej niskiej zabudowy śródmiejskiej, 51,5 °C dla nasłonecznionej elewacji we wnętrzu ulicy, 44,5–58,2 °C dla nadwozi pojazdów pozostawionych bez zacienienia, 46,5 °C dla kamiennych rzeźb fontanny, 44,2 °C dla alejki parkowej z kostki betonowej, 44,4 °C dla wypełnienia spękania w jezdni oraz 36,7–40,7 °C dla nawierzchni bitumicznych i 38,9–40,5 °C dla placów i parkingów z kostki betonowej. Punktowe maksimum całego badania, 70,6 °C, zarejestrowano na przeszkleniu i nadwoziu samochodu zaparkowanego w pełnym słońcu; ze względu na wielkość obiektu i możliwy udział odbicia kierunkowego wartość ta ma charakter orientacyjny i nie została wykorzystana w porównaniach. Jednocześnie badania wykazały wymierne oddziaływanie kompensacyjne wody, zieleni i cienia: tafla wody fontanny utrzymywała 20,1–22,0 °C, nawierzchnia w cieniu koron drzew 18,5 °C, zacieniony trawnik parkowy 21,9 °C, a korony drzew w pełnym słońcu 25,6–27,6 °C, a więc od 11 do ponad 26 stopni mniej niż sąsiadujące z nimi powierzchnie odsłonięte.

W kontekście prognozowanych zmian klimatu znaczenie tych ustaleń rośnie. Zgodnie z projekcjami przedstawionymi w Załączniku 1, w scenariuszu RCP 8,5 liczba dni upalnych w rejonie Zambrowa wzrośnie z ok. 8,20 w dekadzie 2025–2034 do ok. 11,87 w latach 2061–2070, liczba dni gorących z ok. 37,97 do ok. 47,61, a liczba nocy tropikalnych z ok. 3,41 do ok. 5,88, co

oznacza wzrost o 72 % częstości nocy, w których miasto nie wychładza się dostatecznie, a więc dokładnie tych sytuacji, w których miejska wyspa ciepła oddziałuje na zdrowie mieszkańców najsilniej. Jednocześnie dane historyczne ze stacji Białystok za lata 1993–2025 wskazują na rosnący trend liczby dni upalnych, przy średniej rocznej 5,2 dnia i maksimum 17 dni odnotowanym w 1994 roku, oraz na wyraźny wzrost liczby okresów co najmniej pięciodniowych z temperaturą maksymalną nie niższą niż 25 °C, których w 2024 roku odnotowano 7 przy średniej 2,2. Udział silnie nagrzewających się powierzchni sztucznych, przy jednoczesnym skrajnym niedoborze zieleni wysokiej, należy zatem traktować jako kluczowe kryterium typowania stref priorytetowych do działań adaptacyjnych.

Skuteczne łagodzenie zjawiska wymaga skoordynowanego wdrażania błękitno-zielonej infrastruktury, zgodnie z kierunkami działań określonymi w Załączniku II „Koncepcja zazieleniania miasta Zambrowa", w szczególności:

- wprowadzania zadrzewień o systemie gruntowym, zacieniających powierzchnie najsilniej nagrzewające się, w pierwszej kolejności parkingi przyblokowe na osiedlach zabudowy wielorodzinnej, place postojowe obiektów handlowych, rozległe place utwardzone, otoczenie placówek oświatowych, strefy oczekiwania przed przejściami dla pieszych, przystanki komunikacji oraz ciągi piesze wzdłuż dróg krajowych nr 63 i nr 66;
- bezwzględnej ochrony istniejących trawników, skarp trawiastych i zadrzewień osiedlowych, ponieważ pomiary wykazały, że powierzchnia biologicznie czynna jest o 7,6 do 11,6 °C chłodniejsza od przylegającej do niej kostki betonowej przy identycznym nasłonecznieniu, wobec czego każda kolejna zamiana trawnika na miejsce postojowe wprost pogłębia zjawisko;
- zwiększania udziału powierzchni biologicznie czynnej przez tworzenie parków kieszonkowych, skwerów i zieleńców oraz wzmacnianie istniejącej sieci terenów zieleni, w tym parku przy placu gen. Władysława Sikorskiego i kompleksu zieleni nad zalewem miejskim, a także zagospodarowanie terenów nadrzecznych doliny Jabłonki jako ciągłego, chłodnego korytarza rekreacyjnego;
- kompleksowego programu zadrzewienia terenów aktywności gospodarczej i zabudowy poprzemysłowej w południowej części miasta, która jako jedyna w Zambrowie została zaliczona do klasy ekstremalnie wysokiej wskaźnika UHIER, a jednocześnie dysponuje największymi rezerwami terenu możliwymi do rozszczelnienia;
- rozszczelniania i zastępowania nawierzchni nieprzepuszczalnych nawierzchniami przepuszczalnymi w rejonach o największej koncentracji powierzchni utwardzonych, przede wszystkim na parkingach, placach manewrowych i placach postojowych obiektów handlowych;
- eliminowania ciemnych, silnie nagrzewających się elementów zagospodarowania przestrzeni publicznej oraz utrzymywania nawierzchni w dobrym stanie technicznym, co pomiary wskazały jako najprostsze i najtańsze możliwe działanie o natychmiastowym efekcie;
- stosowania zielonych dachów, pnączy na elewacjach oraz pokryć o wysokim współczynniku odbicia w obszarach o ograniczonych możliwościach wprowadzenia zieleni gruntowej, z poszanowaniem wymogów ochrony konserwatorskiej w obrębie historycznej zabudowy śródmiejskiej;

- ochrony korytarza przewietrzania, jaki tworzy dolina Jabłonki wraz z zalewem miejskim, rozdzielająca dwa główne pola miejskiej wyspy ciepła, oraz zachowania powiązań przyrodniczych z terenami otwartymi i kompleksem leśnym Czerwonego Boru;
- rozwoju rozwiązań wodnych w przestrzeni publicznej, których skuteczność potwierdzono pomiarowo na placu gen. Władysława Sikorskiego, przy jednoczesnej świadomości ich lokalnego zasięgu oddziaływania;
- uzupełnienia sieci miejsc chłodu oraz zacienionych miejsc odpoczynku, tak aby ograniczyć udział powierzchni miasta pozostającej poza zasięgiem dojścia pieszego do chłodu, wynoszący obecnie 51,3 %, oraz objąć nimi 305 budynków mieszkalnych dziś pozostających poza tym zasięgiem;
- uwzględniania wymogów adaptacyjnych w planie ogólnym i miejscowych planach zagospodarowania przestrzennego, w szczególności przez ustalanie minimalnego udziału powierzchni biologicznie czynnej oraz zapisów wymuszających zacienianie miejsc postojowych i placów;
- uzupełnienia rozpoznania o inwentaryzację powierzchni uszczelnionych na danych wektorowych BDOT10k w heksagonalnej siatce analitycznej o boku 25 m, co pozwoli precyzyjnie wyznaczyć granice stref priorytetowych i monitorować skuteczność wdrażanych działań;
- rozszerzenia terenowych badań termowizyjnych o sesję nocną, pozwalającą ocenić tempo wychładzania tkanki miejskiej, oraz o pomiary temperatury powietrza w sieci punktów w mieście i poza nim, umożliwiające wyznaczenie atmosferycznej miejskiej wyspy ciepła.

Działania te powinny być wdrażane priorytetowo w rejonach zidentyfikowanych jako problemowe: na terenach aktywności gospodarczej w południowej części miasta, w rdzeniu śródmieścia wraz z ciągami dróg krajowych nr 63 i nr 66, na osiedlach zabudowy wielorodzinnej wraz z parkingami przyblokowymi, na rozległych placach utwardzonych oraz w otoczeniu placówek oświatowych i opiekuńczych. Wyłącznie zintegrowane, wielokierunkowe podejście, łączące planowanie przestrzenne, inwestycje w zieleń i wodę, rozwiązania techniczne oraz edukację mieszkańców, pozwoli skutecznie ograniczyć nasilenie miejskiej wyspy ciepła i podnieść jakość życia mieszkańców Zambrowa w warunkach zmieniającego się klimatu.

Spis rysunków

Rysunek 1. Rozkład średniej temperatury powierzchni czynnej na terenie Miasta Zambrów wyznaczony z czternastu scen termicznych 12
Rysunek 2. Rozkład temperatury powierzchni czynnej na terenie Miasta Zambrów w dniu 27 czerwca 2024 r. 13
Rysunek 3. Rozkład wskaźnika zieleni NDVI na terenie Miasta Zambrów wyznaczony z czternastu scen termicznych 15
Rysunek 4. Zasięg powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła na terenie Miasta Zambrów 17
Rysunek 5. Intensywność miejskiej wyspy ciepła na terenie Miasta Zambrów według klas wskaźnika UHIER 19
Rysunek 6. Struktura pokrycia terenu Miasta Zambrów według mapy pokrycia terenu S2GLC PL, rocznik 2025 21
Rysunek 7. Rozmieszczenie miejsc chłodu oraz zasięg dojścia pieszego do chłodu na terenie Miasta Zambrów 23
Rysunek 8. Termogram: parking i pierzeja pawilonów parku handlowego przy ul. Białostockiej 25
Rysunek 9. Fotografia sceny: parking i pierzeja pawilonów parku handlowego przy ul. Białostockiej 25
Rysunek 10. Termogram: miejsca postojowe i jezdnia osiedlowa u zbiegu ul. Kosseckiego i ul. Pułaskiego 26
Rysunek 11. Fotografia sceny: miejsca postojowe i jezdnia osiedlowa u zbiegu ul. Kosseckiego i ul. Pułaskiego 27
Rysunek 12. Termogram: parking przyblokowy przy ul. Kosseckiego wraz z przylegającym trawnikiem 28
Rysunek 13. Fotografia sceny: parking przyblokowy przy ul. Kosseckiego wraz z przylegającym trawnikiem 28
Rysunek 14. Termogram: ciąg zabudowy wielorodzinnej przy ul. Pułaskiego i przyległa jezdnia 29
Rysunek 15. Fotografia sceny: ciąg zabudowy wielorodzinnej przy ul. Pułaskiego i przyległa jezdnia 29
Rysunek 16. Termogram: skrzyżowanie dróg krajowych z przejściem dla pieszych i zielenią przyuliczną 30
Rysunek 17. Fotografia sceny: skrzyżowanie dróg krajowych z przejściem dla pieszych i zielenią przyuliczną 31
Rysunek 18. Termogram: narożna zabudowa mieszkalno-usługowa kryta dachówką ceramiczną przy drodze krajowej 32
Rysunek 19. Fotografia sceny: narożna zabudowa mieszkalno-usługowa kryta dachówką ceramiczną przy drodze krajowej 32
Rysunek 20. Termogram: ciąg uliczny i chodnik w sąsiedztwie Miejskiego Przedszkola nr 6 w Zambrowie 33
Rysunek 21. Fotografia sceny: ciąg uliczny i chodnik w sąsiedztwie Miejskiego Przedszkola nr 6 w Zambrowie 33
Rysunek 22. Termogram: plac utwardzony przed obiektem sakralnym, zamknięty szpalerem zieleni wysokiej 34
Rysunek 23. Fotografia sceny: plac utwardzony przed obiektem sakralnym, zamknięty szpalerem zieleni wysokiej 35

Rysunek 24. Termogram: budynek o ciemnym pokryciu dachowym z blachy przy placu utwardzonym 36
Rysunek 25. Fotografia sceny: budynek o ciemnym pokryciu dachowym z blachy przy placu utwardzonym 36
Rysunek 26. Termogram: elewacja budynku użyteczności publicznej z zespołem jednostek klimatyzacji 37
Rysunek 27. Fotografia sceny: elewacja budynku użyteczności publicznej z zespołem jednostek klimatyzacji 37
Rysunek 28. Termogram: miejsca postojowe przed budynkiem administracji publicznej i przyległa jezdnia 38
Rysunek 29. Fotografia sceny: miejsca postojowe przed budynkiem administracji publicznej i przyległa jezdnia 38
Rysunek 30. Termogram: ulica obsługująca tereny aktywności gospodarczej z chodnikiem i pasem trawnika 39
Rysunek 31. Fotografia sceny: ulica obsługująca tereny aktywności gospodarczej z chodnikiem i pasem trawnika 40
Rysunek 32. Termogram: skrzyżowanie z przejściem dla pieszych w otoczeniu zabudowy wielorodzinnej i zadrzewienia 40
Rysunek 33. Fotografia sceny: skrzyżowanie z przejściem dla pieszych w otoczeniu zabudowy wielorodzinnej i zadrzewienia 41
Rysunek 34. Termogram: wewnętrzny plac postojowy zamknięty zabudową biurową i szpalerem drzew 42
Rysunek 35. Fotografia sceny: wewnętrzny plac postojowy zamknięty zabudową biurową i szpalerem drzew 42
Rysunek 36. Termogram: parking przyblokowy osłonięty szpalerem starszych drzew liściastych 43
Rysunek 37. Fotografia sceny: parking przyblokowy osłonięty szpalerem starszych drzew liściastych 43
Rysunek 38. Termogram: rozległy plac utwardzony kostką betonową zamknięty szpalerem drzew 44
Rysunek 39. Fotografia sceny: rozległy plac utwardzony kostką betonową zamknięty szpalerem drzew 45
Rysunek 40. Termogram: zachodni fragment placu utwardzonego z wolnostojącymi tablicami reklamowymi 46
Rysunek 41. Fotografia sceny: zachodni fragment placu utwardzonego z wolnostojącymi tablicami reklamowymi 46
Rysunek 42. Termogram: zespół garaży o przegrodach z blachy stalowej przy drodze gruntowej 47
Rysunek 43. Fotografia sceny: zespół garaży o przegrodach z blachy stalowej przy drodze gruntowej 47
Rysunek 44. Termogram: fontanna z lwami na placu gen. Władysława Sikorskiego wraz z nawierzchnią placu 48
Rysunek 45. Fotografia sceny: fontanna z lwami na placu gen. Władysława Sikorskiego wraz z nawierzchnią placu 49
Rysunek 46. Termogram: rzeźbiarski zespół fontanny i tafla wody w niecce 50
Rysunek 47. Fotografia sceny: rzeźbiarski zespół fontanny i tafla wody w niecce 50

Rysunek 48. Termogram: wnętrze parku przy placu Sikorskiego: trawnik, zadrzewienie i alejka spacerowa 51
Rysunek 49. Fotografia sceny: wnętrze parku przy placu Sikorskiego: trawnik, zadrzewienie i alejka spacerowa 51
Rysunek 50. Termogram: ulica śródmiejska z historyczną pierzeją kamienic i chodnikiem z kostki betonowej 52
Rysunek 51. Fotografia sceny: ulica śródmiejska z historyczną pierzeją kamienic i chodnikiem z kostki betonowej 53
Rysunek 52. Termogram: główna ulica śródmieścia z pierzeją kamienic i szeroką jezdnią bitumiczną 53
Rysunek 53. Fotografia sceny: główna ulica śródmieścia z pierzeją kamienic i szeroką jezdnią bitumiczną 54
Rysunek 54. Termogram: skrzyżowanie z sygnalizacją świetlną w sąsiedztwie centrum handlowego 55
Rysunek 55. Fotografia sceny: skrzyżowanie z sygnalizacją świetlną w sąsiedztwie centrum handlowego 55
Rysunek 56. Termogram: wąska ulica śródmiejska o zwartej pierzei z przejściem dla pieszych .. 56
Rysunek 57. Fotografia sceny: wąska ulica śródmiejska o zwartej pierzei z przejściem dla pieszych 56
Rysunek 58. Termogram: parking o nawierzchni z kostki kamiennej częściowo osłonięty koronami starych drzew 57
Rysunek 59. Fotografia sceny: parking o nawierzchni z kostki kamiennej częściowo osłonięty koronami starych drzew 58
Rysunek 60. Termogram: jezdnia osiedlowa przy ul. Kosseckiego z parkingiem 59
Rysunek 61. Fotografia sceny: jezdnia osiedlowa przy ul. Kosseckiego z parkingiem 59
Rysunek 62. Termogram: parking przyblokowy przy ul. Kosseckiego zamknięty ścianą szczytową zabudowy 60
Rysunek 63. Fotografia sceny: parking przyblokowy przy ul. Kosseckiego zamknięty ścianą szczytową zabudowy 60
Rysunek 64. Termogram: rozległy plac utwardzony sąsiadujący z terenem rekreacyjnym i pasem zieleni 61
Rysunek 65. Fotografia sceny: rozległy plac utwardzony sąsiadujący z terenem rekreacyjnym i pasem zieleni 62
Rysunek 66. Termogram: plac utwardzony ograniczony szpalerem drzew i zabudową usługową 63
Rysunek 67. Fotografia sceny: plac utwardzony ograniczony szpalerem drzew i zabudową usługową 63
Rysunek 68. Termogram: jezdnia i plac manewrowy w otoczeniu zabudowy usługowo-magazynowej 64
Rysunek 69. Fotografia sceny: jezdnia i plac manewrowy w otoczeniu zabudowy usługowo-magazynowej 64

Spis tabel

Tabela 1. Zestawienie scen satelitarnych włączonych do analizy temperatury powierzchni czynnej 10
Tabela 2. Struktura pokrycia terenu Miasta Zambrów według mapy pokrycia terenu S2GLC PL, rocznik 2025 20
Tabela 3. Zestawienie scen objętych terenowymi badaniami termowizyjnymi, sesja I (29 lipca 2026 r., godziny popołudniowe, ε = 0,95, temperatura odbita 20 °C) 65
Tabela 4. Zestawienie scen objętych terenowymi badaniami termowizyjnymi, sesja II (30 lipca 2026 r., godziny przedpołudniowe, ε = 0,95, temperatura odbita 20 °C) 67
Tabela 5. Najwyższe odczyty temperatury powierzchni według typu powierzchni i obiektu 67