

Rekomendacje z zakresu bioklimatologii, klimatologii miejskiej oraz technologii błękitno-zielonej infrastruktury dla planowanych rozwiązań z zakresu infrastruktury zielonej w wybranych lokalizacjach na terenie Krakowa

Opracowanie wykonane przez
Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej
Uniwersytetu Jagiellońskiego
oraz
Katedrę Architektury Krajobrazu
Politechniki Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki
w Krakowie

Opracowanie wykonane na zlecenie Gminy Miejskiej Kraków - Urzędu Miasta
Krakowa w ramach projektu LIFE-IP EKOMAŁOPOLSKA „Wdrażanie
Regionalnego Planu Działań dla Klimatu i Energii dla województwa
małopolskiego”

Kraków, 2024-2025

Niniejsze opracowanie zostało wykonane na zlecenie Gminy Miejskiej Kraków - Urzędu Miasta Krakowa (umowa nr WS-032.4.2025; WS-12.042.3.2025.NG; GK-01.032.46.2024; W/I/2955/GK/17/2024). Dokument powstał jako realizacja działania C4 projektu LIFE-IP EKOMALOPOLSKA „Wdrażanie Regionalnego Planu Działań dla Klimatu i Energii dla województwa małopolskiego” (LIFE-IP EKOMALOPOLSKA / LIFE19 IPC/PL/000005) dofinansowanego ze środków programu LIFE Unii Europejskiej oraz Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej. Materiał/opracowanie przedstawia wyłącznie poglądy autorów, a Komisja Europejska i Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej nie ponoszą odpowiedzialności za żadne ewentualne wykorzystanie zawartych w nim informacji. Pracownik merytoryczny Doradca ds. Klimatu i Środowiska mgr Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej - Natalia Gajewska.

Autorzy opracowania:

- dr hab. Anita Bokwa, prof. UJ, mgr Mateusz Durka (Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Jagielloński w Krakowie)
- dr hab. inż. arch. Anna Staniewska, prof. PK, dr inż. Przemysław Kowalski, mgr inż. Tomasz Jaróg, arch. krajobrazu, mgr inż. arch. kraj. Michał Grzybowski (Katedra Architektury Krajobrazu, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki w Krakowie)

Spis treści

Wstęp	4
CZĘŚĆ I	
1. Podstawowe cechy klimatu lokalnego i bioklimatu Krakowa	5
2. Czynniki kształtujące klimat lokalny i bioklimat w świetle postępującej zmiany klimatu	20
3. Wpływ zieleni miejskiej na klimat lokalny miasta w świetle opracowań naukowych z kraju i zagranicy	41
4. Rozwiązania techniczne stosowane w miastach w celu obniżania temperatury powietrza latem	47
CZĘŚĆ II	
5. Charakterystyka wybranych lokalizacji na terenie Krakowa	55
5.1. Kryteria wyboru lokalizacji: dużych parkingów otwartych, placów miejskich, osiedli bloków i ciągów komunikacyjnych	55
5.2. Cechy środowiska przyrodniczego wybranych lokalizacji istotne dla kształtowania klimatu lokalnego	61
5.3. Zagospodarowanie terenu wybranych lokalizacji z punktu widzenia możliwości realizacji zielonej infrastruktury	126
6. Propozycje realizacji nasadzeń lub modyfikacji infrastruktury zielonej w wybranych lokalizacjach	149
6.1. Właściwości i wymagania wybranych roślin	150
6.2. Nasadzenia a warunki hydrologiczne wybranych lokalizacji	155
6.3. Projekty organizacji zielonej infrastruktury w wybranych lokalizacjach przedstawione na rysunkach schematycznych o zakresie i stopniu szczegółowości dopasowanych do lokalizacji z uwzględnieniem rozwiązań typowych proponowanych dla danego miejsca	156
7. Ocena możliwego oddziaływania zaprojektowanych rozwiązań z zakresu zielonej infrastruktury na warunki termiczne i bioklimatyczne Krakowa	170
8. Zieleń Rynku Głównego w Krakowie jako szczególny przypadek infrastruktury zielonej miasta i jej rola w kształtowaniu bioklimatu i klimatu lokalnego	178
9. Podsumowanie i wnioski	186
10. Literatura	191
11. Załączniki - karty obiektów i plany w skali 1:500	

Wstęp

Postępująca zmiana klimatu jest przedmiotem wielu badań, tak w zakresie jej przyczyn, jak skutków i przewidywań dalszego jej przebiegu. Równie ważnym aspektem jest podejmowanie działań adaptacyjnych, czego podstawowym warunkiem jest zrozumienie i zaakceptowanie faktu, że zmiana klimatu jest zjawiskiem realnym, rzeczywiście zachodzącym tak w skali globalnej, jak lokalnej. Kolejnym warunkiem podjęcia działań adaptacyjnych jest akceptacja faktu, że system klimatyczny ma wymiar globalny co oznacza m.in. dużą jego bezwładność. Konsekwencją tego jest, że obserwowana zmiana klimatu, wywołana głównie antropogeniczną zmianą składu chemicznego atmosfery, postępuje w perspektywie wieloletniej i jakiegokolwiek działania ludzi podjęte teraz dla ochrony klimatu mogą przynieść spodziewane efekty także dopiero w perspektywie wieloletniej. Zatem oprócz tych działań konieczne jest przystosowanie się do takich warunków pogodowych i klimatycznych jakich doświadczamy obecnie i jakich spodziewamy się w najbliższej przyszłości.

Cechą charakterystyczną obserwowanej zmiany klimatu jest wzrost częstości i intensywności ekstremalnych zjawisk pogodowych. W przypadku terenu Polski najwięcej problemów sprawiają powodzie, susze, huraganowe wiatry i trąby powietrzne oraz fale upałów. Działania adaptacyjne obejmują zatem inwestycje z zakresu gospodarki wodnej, aby ograniczać rozmiary fal powodziowych i związane z tym straty oraz zapewniać dostawy wody w czasie suszy, rozwój systemów ostrzegania przed zagrożeniami pogodowymi, aby m.in. minimalizować straty związane z huraganowymi wiatrami poprzez zabezpieczenie majątku, a także zmiany w zagospodarowaniu terenów, zwłaszcza zurbanizowanych, aby polepszyć warunki bioklimatyczne. O ile dwie pierwsze grupy działań mają wymiar krajowy lub regionalny to ostatnia z wymienionych grup działań ma wymiar lokalny i dotyczy polepszenia warunków bioklimatycznych w miejscu zamieszkania i jego otoczeniu w okresie występowania bardzo wysokiej temperatury powietrza. Zwraca się przy tym uwagę, że temperatura powietrza jest przewodnim elementem klimatu, powiązanym poprzez liczne procesy fizyczne z innymi elementami meteorologicznymi a istotnym dla człowieka jako ssaka stałocieplnego, dla którego przebywanie w ekstremalnie wysokiej temperaturze powietrza stanowi realne zagrożenie zdrowia i życia.

Celem ekspertyzy jest opracowanie propozycji dotyczących tworzenia lub modyfikacji infrastruktury zielonej na terenie Krakowa, w wybranych lokalizacjach reprezentujących tereny

często uczęszczane przez mieszkańców oraz ocena, na ile takie działania mogą się przyczynić do poprawy warunków bioklimatycznych miasta w okresie letnim. W pierwszej części zostanie przedstawiony realny potencjał roślinności miejskiej do modyfikacji temperatury powietrza i kompleksowo definiowanych warunków bioklimatycznych, na podstawie badań zaprezentowanych w publikacjach naukowych. Następnie zostaną przedstawione propozycje modyfikacji istniejących nasadzeń lub zorganizowania nowych nasadzeń w wybranych lokalizacjach Krakowa, reprezentujących różne rodzaje przestrzeni miejskiej. Wyniki zostaną odniesione do szczegółowych warunków środowiskowych a ponadto zostanie oszacowany możliwy realny wpływ takich inwestycji na poprawę warunków bioklimatycznych. Szczególnym przypadkiem opisanych działań jest planowane sadzenie drzew na Rynku Głównym w Krakowie co zostanie omówione w części końcowej.

CZĘŚĆ I

1. Podstawowe cechy klimatu lokalnego i bioklimatu Krakowa

Klimat jest jednym z elementów środowiska przyrodniczego, a jego badaniem zajmuje się dział geografii jakim jest klimatologia. Badania klimatologiczne prowadzone są w różnych skalach czasowo-przestrzennych: od makroskali (makroklimat, np. klimat danego kontynentu czy kraju), przez mezoskalę (np. mezoklimat regionu) po **klimat lokalny** (np. klimat miasta) i mikroskalę (np. mikroklimat danego fragmentu ulicy czy stoku wzniesienia) (Yoshino 1975). Klimat miasta jest zatem odmianą klimatu lokalnego i na terenie miasta mamy do czynienia z mozaiką mikroklimatów co jest spowodowane bardzo dużym zróżnicowaniem powierzchni terenu na obszarach zurbanizowanych. Biometeorologia i bioklimatologia to działy klimatologii stosowanej zajmujące się badaniem bezpośrednich i pośrednich związków między środowiskiem geofizycznym i geochemicznym a żywymi organizmami (Kozłowska-Szczęsna i in. 2004). **Bioklimat** miasta należy zatem rozumieć jako wpływ warunków atmosferycznych panujących w mieście na samopoczucie i zdrowie mieszkańców, ale także roślin i zwierząt tam żyjących. Warunki te to głównie własności fizyczne i chemiczne powietrza, a także zjawiska atmosferyczne (np. deszcz, mgła) zależne przede wszystkim od sytuacji synoptycznej, ale modyfikowane tak przez wpływ zabudowy miejskiej, jak przez lokalne warunki środowiskowe. Warunki biometeorologiczne i bioklimatyczne danego miasta są zatem ściśle powiązane z jego klimatem lokalnym.

W przypadku Krakowa modyfikacje klimatu w skali lokalnej wynikają z jednej strony z obecności terenu zurbanizowanego, a z drugiej z położenia miasta we wklęsłej formie terenu, czyli w dolinie Wisły. Ponadto miasto leży na styku wielkich struktur tektonicznych: Karpat Zachodnich z Podkarpaciem i Wyżyn Polskich (Kondracki 2000), co determinuje duże zróżnicowanie cech środowiska przyrodniczego miasta i jego najbliższych okolic. Aby w sposób kompletny badać klimat lokalny takiego miasta jak Kraków, konieczne jest uwzględnienie warunków klimatycznych jednostek otaczających miasto oraz procesów zachodzących w profilu pionowym w obrębie doliny. Z tego względu uzasadnione jest określenie „**mezoklimat miasta**”, rozumiane zarówno jako zróżnicowanie klimatu lokalnego obszaru zurbanizowanego pod wpływem mozaiki powierzchni czynnych, na które nakłada się istotny wpływ rzeźby terenu, jak też jako wpływ organizmu miejskiego na klimat regionu, w jakim znajduje się Kraków (Bokwa 2010). Obecność zabudowy miejskiej powoduje modyfikacje przede wszystkim bilansu promieniowania, temperatury i wilgotności powietrza, prędkości wiatru i składu chemicznego powietrza. Wpływ zróżnicowanej rzeźby terenu w Krakowie i okolicach przejawia się w generowaniu (przy sprzyjających warunkach pogodowych) procesów znanych z obszarów górskich, jak występowanie inwersji temperatury powietrza (czyli wzrost temperatury z wysokością nad poziomem gruntu), tworzenie się zastoiska chłodnego powietrza w dnie doliny poza miastem i występowanie spływów katabatycznych powietrza (grawitacyjne spływy chłodnego powietrza po zboczach doliny do terenów najniżej położonych). Klimat lokalny Krakowa jest zatem wypadkową wszystkich wspomnianych procesów. Niniejsze opracowanie dotyczy możliwości polepszenia, czyli melioracji warunków bioklimatycznych Krakowa poprzez modyfikacje klimatu lokalnego przy wykorzystaniu zieleni miejskiej. Zatem istotne dla dalszych rozważań jest określenie które cechy klimatu lokalnego i w jakim zakresie pogarszają bioklimat Krakowa. Co także istotne: zróżnicowanie przestrzenne warunków atmosferycznych w skali klimatu lokalnego występuje przy określonych warunkach pogodowych, tzn. w czasie pogody bezchmurnej lub z małym zachmurzeniem i bezwietrznej lub z małą prędkością wiatru. Wynika to z wcześniej opisanej zależności, że czym mniejsza skala przestrzenna w jakiej rozpatrujemy zjawiska klimatyczne – tym większy wpływ cech podłoża na cechy fizyczne warstwy powietrza od podłoża do kilku metrów nad poziomem gruntu, w której funkcjonują ludzie, rośliny i zwierzęta. Ten wpływ podłoża jest widoczny przy opisanych stabilnych warunkach pogodowych, natomiast przy silnym wietrze i /lub dużym zachmurzeniu a zwłaszcza przy opadach atmosferycznych zwykle występuje silne mieszanie powietrza związane z intensywną turbulencją co powoduje

ujednolicenie cech fizycznych powietrza w omawianej warstwie.

Warunki klimatu lokalnego określamy poprzez wartości takich parametrów jak temperatura i wilgotność powietrza, prędkość wiatru itd. oraz ich zróżnicowanie przestrzenne na danym niewielkim terenie. W kontekście klimatu lokalnego nie bada się np. zróżnicowania przestrzennego ciśnienia atmosferycznego czy zachmurzenia, gdyż są to elementy meteorologiczne kształtowane przez procesy cyrkulacji atmosferycznej, zachodzące w dużej skali przestrzennej. Natomiast warunki bioklimatyczne określamy wskaźnikami oceniającymi warunki pogodowe lub klimatyczne w danym miejscu pod kątem ich oddziaływania na organizm człowieka, głównie na bilans cieplny i termoregulację. Wskaźniki bioklimatyczne powstały i nadal powstają na bazie szerokiego podejścia metodycznego a ich przegląd można znaleźć w pracy de Freitas i Grigorievej (2015). W prostych wskaźnikach wykorzystuje się tylko wartości progowe pojedynczych elementów, np. oblicza się liczbę dni upalnych, czyli takich, kiedy maksymalna temperatura powietrza przekroczyła 30°C. Na organizm człowieka działa jednak w każdym momencie cały kompleks warunków pogodowych i to jest oceniane przy użyciu kompleksowych wskaźników, w których w postaci równania matematycznego opisuje się wzajemne zależności kilku elementów meteorologicznych w kontekście ich oddziaływania na organizm człowieka. Przykładowo, wpływ temperatury powietrza na odczucia cieplne i bilans cieplny ciała człowieka zależy w dużym stopniu od prędkości wiatru. Przy niskiej temperaturze duża prędkość wiatru wzmacnia utratę ciepła i zwiększa zagrożenie przechłodzeniem, czyli pogarsza warunki biotermiczne. Natomiast przy wysokiej temperaturze duża prędkość wiatru sprzyja ochładzaniu organizmu, polepsza warunki biotermiczne i pomaga uniknąć przegrzania. Najnowsze wskaźniki wykorzystują modele bilansu cieplnego ciała człowieka. Do oceny bioklimatu włącza się także ocenę stanu sanitarnego powietrza.

Najszerzej omawianą cechą klimatu miasta jest **miejska wyspa ciepła (MWC)**, czyli lokalna modyfikacja pola temperatury powietrza. Dla Krakowa to zjawisko zostało opisane w opracowaniu *Ekspertyza...* (2023), gdzie omówiono także występowanie tzw. nocy tropikalnych w Krakowie. W przypadku Krakowa, z uwagi na duży wpływ rzeźby terenu na kształtowanie klimatu lokalnego, MWC jest tylko jednym z elementów złożonej struktury pola temperatury powietrza. MWC jest elementem klimatu Krakowa związanym przede wszystkim z okresem nocnym. W podsumowaniu wspomnianego opracowania podkreślono, że w ciągu dnia, zwłaszcza latem, kiedy temperatura powietrza jest najwyższa, obserwujemy dużą zmienność temperatury powietrza w czasie i niewielkie różnice między poszczególnymi częściami miasta. MWC często wtedy nie występuje a nawet w wielu zacienionych miejscach

miasta jest chłodniej niż na otwartych terenach zielonych poza miastem. Duże różnice temperatury pojawiają się natomiast w nocy. Warto w tym miejscu zaznaczyć, że MWC jest zjawiskiem występującym przez cały rok, zwykle niezauważanym i nie odczuwanym przez mieszkańców. Może natomiast mieć znaczenie dla zdrowia i samopoczucia w czasie występowania fal upałów, kiedy w ciągu dnia temperatura powietrza przekracza 30°C. W takich ekstremalnych warunkach termicznych, wynikających zwykle z napływu tropikalnych mas powietrza, istotne jest aby w nocy temperatura powietrza spadła poniżej 20°C. W przeciwnym razie mówimy o wystąpieniu tzw. nocy tropikalnej a są to warunki uniemożliwiające prawidłową regenerację organizmu człowieka w naszej strefie klimatycznej. W tej sytuacji wolniejsze wychładzanie się terenów zurbanizowanych w porównaniu z terenami pozamiejskimi, czyli jedna z przyczyn powstawania miejskiej wyspy ciepła, jest czynnikiem niekorzystnym, gdyż może spowodować, że w mieście wystąpi noc tropikalna podczas gdy poza miastem takie zjawisko nie będzie notowane. Należy jednak zauważyć, że źródłem problemu jest występowanie fali upałów, a nie samo zjawisko miejskiej wyspy ciepła. Fale upałów to zjawiska związane z wielkoskalowymi procesami atmosferycznymi i w czasie ich występowania rola zabudowy miejskiej w kształtowaniu temperatury powietrza jest drugorzędna. Jeśli w okresie letnim nie ma fali upałów to samo oddziaływanie zabudowy miejskiej nie stanowi źródła problemów w zakresie wpływu na samopoczucie mieszkańców. W Krakowie noce tropikalne najczęściej występują w zwartej zabudowie śródmiejskiej, w innych typach zabudowy w dnie doliny jest ich o około 25% mniej, a w obszarach zabudowanych położonych 50 m ponad dnem doliny jest to około 50-75% mniej niż w śródmieściu (Bokwa, Limanówka 2014).

Intensywność MWC to różnica temperatury powietrza między obszarem miejskim i pozamiejskim i zależy ona od typu zabudowy miejskiej. Największe różnice są obserwowane nocą dla zwartej, wysokiej zabudowy, a najniższe dla terenów zieleni miejskiej. W Krakowie przy sprzyjających warunkach pogodowych w lecie (noc bezchmurna i bezwietrzna lub z małym zachmurzeniem i małą prędkością wiatru) największej intensywności MWC można się spodziewać w centrum miasta (ze zwartą zabudową): ok. 6,5°C. Wartość ta jest nie tyle wynikiem bardzo znacznego nagrzania obszarów miejskich w ciągu dnia poprzedzającego okres nocny, co tworzenia się zastoiska chłodnego powietrza poza miastem. Jest to m.in. skutkiem także już wspomnianych spływów katabatycznych i inwersji termicznych. Dla porównania, dla osiedli bloków mieszkalnych ta wartość wynosi ok. 3,5°C w dnie doliny i 2,5°C powyżej 50 m ponad dnem doliny, dla zabudowy willowej ok. 4°C w dnie doliny i 1,5°C powyżej 50 m ponad dnem doliny (Bokwa 2016). Są to wartości jakich

można się spodziewać w lecie, przy sprzyjającej pogodzie przez ok. 1-2 godziny pod koniec nocy; w innych warunkach różnice te będą mniejsze lub zanikną. Duże zróżnicowanie przestrzenne temperatury powietrza jest skutkiem złożonej geometrii tkanki miejskiej. Każdy budynek zacienia teren sąsiadujący co powoduje duże różnice w temperaturze różnych powierzchni (ścian, ulic itp.), a to przekłada się na temperaturę powietrza zalegającego bezpośrednio nad daną powierzchnią i na oddziaływanie bioklimatyczne atmosfery w mieście. Skala oddziaływania MWC ma w przypadku Krakowa związek nie tylko z jego położeniem i czynnikami atmosferycznymi, ale również ze znaczącą skalą rozwoju przestrzennego miasta oraz intensyfikacją zabudowy dawnych obszarów podmiejskich w ostatnich 70 latach. Zabudowa Krakowa nie tworzy jednak zwartego obszaru, ale zajmuje kilka obszarów oddzielonych od siebie dużymi terenami zielonymi lub wodnymi, co powoduje, że należy raczej mówić o “archipelagu MWC” niż jednej MWC.

Oddziaływanie temperatury powietrza na organizm człowieka jest zagadnieniem złożonym, gdyż jest to tylko jeden z wielu elementów kształtujących bilans cieplny ciała człowieka. Do oceny warunków biotermicznych Krakowa były wykorzystywane różne wskaźniki. Powyżej wspomniano o liczbie dni gorących (temperatura maksymalna powyżej 20°C), dni upalnych (temperatura maksymalna powyżej 30°C), nocy tropikalnych (temperatura minimalna powyżej 20°C) i fal upałów (ciąg co najmniej 3 dni upalnych). Wieloletnie pomiary realizowane na stacji klimatologicznej Instytutu Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego w Ogrodzie Botanicznym pozwalają stwierdzić, że liczba wspomnianych termicznych dni charakterystycznych rośnie w ostatnich latach. Biorąc pod uwagę pomiary od 1901 r. do roku 2020 włącznie, najwięcej dni gorących zanotowano na tej stacji w 2018 roku: 100 dni (w latach 1980-2020 zwykle wartość ta mieściła się w przedziale 60-80 dni). Dni upalnych jest zwykle 10-20 w roku, ale w rekordowym roku 2015 było ich prawie 40. Nocy tropikalnych jest zwykle tylko kilka w roku a w 2010 r. było ich 10, najwięcej w analizowanym okresie (Matuszko i in. 2023). Pomiary przeprowadzone przez A. Bokwę w latach 2009-2021 w sieci pomiarowej na terenie Krakowa i okolic (opis sieci w pracach Bokwa 2010, Bokwa i in. 2015) pozwoliły rozpoznać aktualne zróżnicowanie przestrzenne występowania termicznych dni charakterystycznych na terenie Krakowa i okolic. Średnia roczna liczba dni upalnych sięga 35-40 dni/rok na terenach z zabudową blokową i willową w zachodniej części miasta w dnie doliny, zaś najniższe wartości (15-20 dni/rok) charakteryzują duże tereny zielone jak Błonia czy Ogród Botaniczny oraz tereny położone nad Wisłą we wschodniej części miasta, tereny zabudowy blokowej we wschodniej części miasta w dnie doliny Wisły, tereny zabudowy blokowej położone 50 m powyżej dna doliny oraz tereny w

centrum miasta, ale z dużym udziałem zieleni wysokiej (np. Plac Św. Ducha przy Plantach). W całym okresie 2009-2021 łączna liczba fal upałów była najwyższa także na terenach z zabudową blokową i willową w zachodniej części miasta w dnie doliny (ok. 70 fal upałów), zaś najniższa (20-30 fal upałów) na terenach wymienionych wyżej jako charakteryzujące się najniższą liczbą dni upalnych. Łączna liczba nocy tropikalnych w okresie 2009-2021 była natomiast najwyższa na Placu Św. Ducha przy Plantach i w kanionie miejskim (Al. Krasińskiego) i wyniosła 70-80 przypadków. Najniższą liczbę nocy tropikalnych (1-2 przypadki) zanotowano na obszarach pozamiejskich objętych zastoiskami chłodnego powietrza i spływami katabatycznymi (dno doliny Wisły na zachód od granic miasta i skłon Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej). Przeprowadzone analizy, obejmujące także zagospodarowanie terenu wokół punktów pomiarowych, pokazują, że w Krakowie obszary o największym obciążeniu cieplnym w dzień i w nocy nie są te same, między terenami o zabudowie blokowej lub willowej położonymi w dnie doliny i 50 m wyżej nie ma statystycznie istotnych różnic w użytkowaniu terenu, a różnice w liczbie dni upalnych i liczbie fal upałów sięgają 50% co jest skutkiem oddziaływania rzeźby terenu na procesy atmosferyczne w mezoskali. Największe obciążenie ciepłem w czasie dnia w upalne dni panuje w dnie doliny w zabudowie blokowej i willowej. Inna sytuacja ma miejsce w nocy. Obciążenie ciepłem jest wtedy największe w centrum Starego Miasta i w kanionach miejskich, w dnie doliny, w zachodniej części miasta. Różnice w obciążeniu ciepłem między terenami z tymi samymi rodzajami zabudowy, ale położonymi w różnych strefach wysokościowych miasta są jeszcze większe niż w dzień. W obszarach z zabudową willową położonych 50 m powyżej dna doliny obciążenie ciepłem wynosi zaledwie 1/6 obciążenia w dnie doliny. Dla zabudowy blokowej to 2/3 i tak samo ma się obciążenie ciepłem między wschodnią i zachodnią częścią doliny, w części zachodniej jest większe. Warto zauważyć, że noce tropikalne występują w warunkach bezchmurnych i bezwietrznych lub z małym zachmurzeniem i małą prędkością wiatru. W takich warunkach tworzą się także inwersje termiczne i spływy katabatyczne co może mieć wpływ na obniżenie temperatury powietrza na terenach zabudowanych położonych 50 m powyżej dna doliny. Przeprowadzone badania pokazują także, że obszary zielone miasta, gdzie występują drzewa tworzące zwartą powierzchnię koron obniżają temperaturę maksymalną, ale podwyższają minimalną. Dzieje się tak dlatego, że korony drzew w dzień dają cień co powoduje, że promieniowanie słoneczne nie dociera do podłoża zatem nie jest tam pochłaniane i potem nie jest oddawane jako ciepło. Natomiast w nocy korony drzew stanowią barierę utrudniającą wypromieniowanie z podłoża, co powoduje wolniejsze wychładzanie podłoża i wyższą temperaturę minimalną niż w innych obszarach miasta.

Opracowanie dotyczące prognoz wzrostu obciążenia miasta ciepłem w kolejnych dekadach (Bokwa i in. 2018a, 2019) pokazało, że w zależności od tego jak intensywnie będzie przebiegać dalszy wzrost temperatury globalnej, Kraków prawdopodobnie będzie doświadczał pod koniec XXI w. więcej dni gorących (czyli z maksymalną dobową temperaturą powyżej 25°C) rocznie niż w wieloleciu 1971–2000. W latach 1971-2000 tereny z najmniejszą średnią roczną liczbą dni gorących (np. lasy) notowały 4 takie dni w roku, w terenach z intensywną zabudową w dnie doliny występowały wartości maksymalne, ok. 60 dni/rok, średnia dla całego miasta wynosiła ok. 20 dni. Dla okresu 2071-2100 otrzymano prognozy dla różnych scenariuszy dalszych emisji CO₂. Przy umiarkowanym wzroście emisji opisane wartości wzrosną do: 15, 78 i 38 dni/rok, a przy intensywnym wzroście emisji prognozowane są odpowiednio 29, 100 i 59 dni/rok. W przypadku nocy tropikalnych (temperatura minimalna powyżej 20°C) dla okresu 1971-2000 wartości minimalna, maksymalna i średnia to 0, 9 i 2 nocy/rok, dla umiarkowanego wzrostu emisji: 3, 20 i 9 nocy/rok, a dla intensywnego wzrostu emisji 12, 38 i 23 noc/rok. Opracowanie to pokazało także, że wklęsłe formy terenu, w których znajduje się zabudowa miejska są najbardziej narażone na występowanie wysokich wartości temperatury maksymalnej i liczba dni gorących jest tam znacząco większa niż na wypukłych formach terenu. Jest to zjawisko znane z obszarów górskich, gdzie w dnach dolin obserwuje się najniższe temperatury minimalne i najwyższe maksymalne w porównaniu z pozostałymi terenami w profilu pionowym.

Kolejnym ważnym elementem klimatu lokalnego Krakowa w kontekście bioklimatycznym jest **wilgotność powietrza**, a zwłaszcza występowanie mgieł. Wspomniane wcześniej tworzenie się zastoisk chłodnego powietrza sprzyja powstawaniu mgieł. Po II Wojnie Światowej roczna liczba dni z mgłą w centrum Krakowa zmalała ze 120 do 20 w latach 90. XX w. (Wypych 2007), co polepszyło warunki aerosanitarne. Mgła tworzy się bowiem w warunkach bezwietrznych lub przy bardzo słabym wietrze, czyli w warunkach sprzyjających wzrostowi stężeń zanieczyszczeń, a dodatkowo kropelki wody zawieszone w powietrzu, tworzące mgłę, wchodzą w reakcje chemiczne z zanieczyszczeniami powietrza co prowadzi do tworzenia się nowych zanieczyszczeń, w tym toksycznych dla organizmów żywych. Ponadto mgła ogranicza dopływ promieniowania słonecznego co niekorzystnie oddziałuje na naszą psychikę i na stan sanitarny powietrza. Istnieją związki między występowaniem mgły a MWC a wynikają one z faktu, że zastoiska chłodnego powietrza, tworzące się w dnie doliny poza miastem sprzyjają powstawaniu mgły, ale z drugiej strony powstawanie mgły podnosi temperaturę minimalną powietrza poza miastem co powoduje zmniejszenie intensywności MWC (w dnie doliny o ok. 1°C, ale głównie przy pogodzie

bezhmurnej i bezwietrznej). W Krakowie ważnym czynnikiem jest zasięg pionowy mgły; obszary w dnie doliny zawsze doświadczają mgły w dniach, kiedy ona występuje, natomiast obszary położone ok. 50 m ponad dnem doliny - tylko w niektórych przypadkach. Często są ponad warstwą mgły i tam intensywność MWC nie podlega takim zmianom jak w dnie doliny. Wraz ze wzrostem zachmurzenia i prędkości wiatru rola mgły słabnie i jest taka sama w całym mieście (Bokwa i in. 2018b).

Opady atmosferyczne w Krakowie (zarówno sumy roczne opadów jak liczba dni z opadem) wykazują duże zróżnicowanie przestrzenne, spowodowane oddziaływaniem wypukłych form terenu jako barier orograficznych dla przemieszczających się mas powietrza. W latach 50. i 80. XX w. zagadnienie to było badane głównie przez J. Lewińską (Lewińska 1967, Lewińska i in. 1990). W latach 1956–1960 prowadzono pomiary opadów w 65 punktach zlokalizowanych na terenie miasta i do 20 km od jego granic, zaś w latach 1983–1984 liczba punktów pomiarowych zmniejszyła się do 36. Chociaż w latach 80. XX w. Kraków miał dwukrotnie więcej mieszkańców niż w latach 50. i trzykrotnie większy obszar, wyniki z obu okresów pomiarowych są zbliżone. Największe roczne sumy opadów zanotowano na wypukłych formach terenu w zachodniej i południowej części obszaru oraz w centrum miasta. W obrębie doliny Wisły stwierdzono różnicę rzędu 100 mm między otrzymującą więcej opadów częścią zachodnią i otrzymującą ich mniej częścią wschodnią. W samym mieście opady także były znacznie zróżnicowane, od 600 do 850 mm rocznie (wartości średnie z okresu 1956–1960). Wielkość różnicy między opadami w mieście i poza miastem przyjmowała różne wartości, zależnie od tego, jakie stacje miejskie i pozamiejskie porównywano. Lewińska wyjaśniła zaobserwowane zróżnicowanie przestrzenne opadów wpływem miasta, ale podkreśliła, że wpływ rzeźby terenu jest czynnikiem o większym znaczeniu niż obecność obszaru zurbanizowanego. Badania przeprowadzone w XXI w. z wykorzystaniem późniejszych danych (Bokwa 2010, Bokwa, Limanówka 2008, Bokwa, Skowera 2008) potwierdziły prawidłowości zaobserwowane przez J. Lewińską i pokazały, że roczne sumy opadów są najwyższe w południowej części miasta (ok. 700 mm/rok), gdzie próg Pogórza Wielickiego tworzy barierę orograficzną dla napływających z zachodu i północy mas powietrza. W centrum miasta sumy te wynoszą ok. 650 mm/rok, a we wschodniej części miasta zaledwie ok. 550 mm/rok. Północna część miasta znajduje się w tzw. cieniu opadowym co wynika z osłaniającego oddziaływania skłonu Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej. Średnia roczna liczba dni z opadem jest najwyższa w centrum miasta i wynosi ok. 215, zaś w północnej i wschodniej części miasta nie przekracza 150 dni, przy czym różnice te wynikają przede wszystkim z liczby dni z opadami o słabej wydajności, czyli o sumie

dobowej do 5 mm, dlatego to nie w centrum miasta występują najwyższe sumy opadów. W przypadku Krakowa nie znajduje zatem potwierdzenia reguła znana z wielu dużych miast, zwłaszcza amerykańskich, że obszary miejskie charakteryzują się zwiększoną liczbą intensywnych opadów o dużej wydajności. Ponadto w lecie, kiedy opady burzowe występują najczęściej, zróżnicowanie sum opadów między stacjami jest najmniejsze. Zimą pojawiają się największe różnice w sumach opadów między centrum miasta a terenami pozamiejskimi; w centrum miasta są one o ok. 30 mm wyższe niż na terenach objętych tzw. cieniem opadowym. W tej porze roku zanieczyszczenie powietrza w Krakowie jest największe co może się przyczyniać do zwiększenia sum opadów poprzez zwiększenie w powietrzu liczby tzw. jąder kondensacji, czyli cząstek, na których mogą się tworzyć krople opadu. Porównanie sum opadów w Krakowie i na terenach otaczających z dwu podokresów: 1972–1988 (wysokie zanieczyszczenie powietrza, duża emisja sztucznego ciepła) i 1989–2005 (mniejsze zanieczyszczenie powietrza i mniejsza emisja sztucznego ciepła), pokazało, że mimo znacznego spadku zanieczyszczenia powietrza w Krakowie po 1989 r., nie wystąpił w sumach opadów na poszczególnych stacjach ani trend wzrostowy, ani spadkowy. Struktura przestrzenna opadów nie uległa zmianie po 1989 r. Można zatem potwierdzić, że to rzeźba terenu jest głównym czynnikiem różnicującym sumy roczne opadów na terenie Krakowa i okolic. W przeciwieństwie do temperatury powietrza, opady atmosferyczne nie wykazują tendencji wzrostowej lub spadkowej w ostatnich dziesięcioleciach, ale charakteryzuje je duża zmienność, co oznacza, że są elementem bardzo nieprzewidywalnym, tak w zakresie ilości wody jaką otrzyma w postaci opadów dany obszar, jak też w zakresie rozłożenia opadów w czasie roku. Ma to kluczowe znaczenie dla funkcjonowania środowiska, np. dla warunków wegetacji roślin, ale też dla mieszkańców, choćby w kontekście zagrożenia powodziowego. Ta sama ilość opadów równomiernie rozłożona w czasie lub docierająca do danego terenu w postaci rzadko występujących krótkotrwałych ulew ma bardzo różne skutki dla środowiska. W pierwszym wypadku pozwala na niezakłócony rozwój roślin i polepsza zasoby wód podziemnych, a w drugim stwarza zagrożenie tak powodzią, jak suszą. Warto zaznaczyć, że przewiduje się, że jednym ze skutków globalnego ocieplenia będzie prawdopodobnie zarówno wzrost intensywności opadów, jaki występowanie dłuższych okresów trwania suszy (IPCC 2021).

Istotnym elementem klimatu lokalnego miasta jest pole **wiatru**, charakteryzowane rozkładem przestrzennym prędkości wiatru i jego kierunku. Pole wiatru w Krakowie i historia jego badań były przedmiotem opracowania wykonanego dla Urzędu Miasta Krakowa przez UJ, AGH i IMGW (*Wstępne opracowanie...* 2019). Analiza danych pomiarowych z lat 1999-2018

ze stacji UJ, AGH i IMGW działających na terenie miasta i okolic pokazała, że na obszarach położonych w dolinie Wisły rzeźba terenu znacząco modyfikuje różę wiatrów i decyduje o dominacji kierunków zgodnych z przebiegiem doliny, czyli wschodniego

i zachodniego (ok. 60% przypadków), co było także podkreślane we wcześniejszych pracach. Na terenie miasta w dnie doliny ponad 93% przypadków pomiarów prędkości wiatru wskazało na wartości do 4 m/s. Poza miastem jest to ok. 90%, a prędkość wiatru 4 m/s jest wartością graniczną dla tworzenia się mgieł (jeśli występują inne warunki atmosferyczne konieczne dla utworzenia się mgły), tzn. mgła tworzy się przy braku wiatru albo przy jego prędkości do 4 m/s. Odsetek cisz atmosferycznych (czyli sytuacji z brakiem wiatru) wynosi w Ogrodzie Botanicznym 13,3% w roku, w Balicach to 8,7%, AGH: 10,9%, Igołomia: 23%, Wola Justowska: 46,9%, Libertów: 11,3%, Siercza: 18,4%. Najwyższe zanotowane prędkości wiatru w badanym okresie to 9 m/s w Ogrodzie Botanicznym w dniu 18.11.2004 w terminie południowym i 1.03.2008 w terminie wieczornym. W Balicach natomiast było to 20 m/s w dniu 28.10.2002 w terminie porannym. W półroczu chłodnym jest nieco większa częstość występowania wiatru z przedziału prędkości 5-7 m/s niż w półroczu ciepłym, w centrum miasta częstość ta jest trzykrotnie większa, ale mimo tego sięga zaledwie 4,4%. W Ogrodzie w ogóle nie zanotowano wartości powyżej 7 m/s w półroczu ciepłym, a w półroczu chłodnym nie zanotowano nigdy wartości powyżej 9 m/s, czyli wiatru silnego lub bardzo silnego, jedynie 6 przypadków wiatru dość silnego. Tymczasem w Balicach, czyli poza miastem w dnie doliny w półroczu chłodnym zanotowano 236 przypadków prędkości wiatru powyżej 9 m/s, w tym 12 przypadków o prędkości powyżej 13 m/s. Dla żadnego zakresu prędkości wiatru w Ogrodzie Botanicznym i Balicach nie stwierdzono istotnych statystycznie trendów zmian częstości występowania. Na stacjach pomiarowych Siercza i Libertów, zlokalizowanych na południe od granic miasta, zaznacza się również większy udział kierunku południowego S i południowo-wschodnio-południowego SSE co wiąże się z występowaniem wiatrów fenowych. Na terenie miasta Krakowa i okolic, w porze dziennej notuje się większy udział wyższych prędkości wiatru i mniejszą częstość występowania ciszy atmosferycznej, szczególnie w półroczu chłodnym. W godzinach nocnych następuje spadek prędkości wiatru, który obserwuje się przede wszystkim w półroczu ciepłym. Największym udziałem charakteryzują się wiatry bardzo słabe i słabe o średniej prędkości w przedziale 0,6–1,0 m/s i 1,1–2,0 m/s. Zarówno w porze dziennej jak i nocnej na terenie miasta Krakowa występuje niski udział wiatru o średniej prędkości $> 4,1$ m/s. Wpływ zabudowy miejskiej na przepływ wiatru zależy od jej gęstości, wysokości a także od rozmieszczenia budynków względem siebie. Przepływ powietrza pomiędzy obszarami pozamiejskimi a miastem jest jednym

z czynników wpływających na formowanie się zjawiska miejskiej wyspy ciepła oraz występowanie epizodów smogowych. Prędkość oraz kierunek wiatru obserwowany w miastach w dużej mierze zależy od gęstości i struktury zabudowy. Zdolność do przewietrzania miasta wpływa na częstość występowania wysokich stężeń zanieczyszczeń i jest związana z położeniem miasta i warunkami meteorologicznymi a w szczególności warunkami anemologicznymi wpływającymi na efektywność dyspersji zanieczyszczeń w planetarnej warstwie granicznej. We wspomnianym opracowaniu obliczono powierzchni frontowej (FAI) dla Krakowa i uzyskane wyniki pokazały, że ścisłe centrum miasta jest obszarem o najgorszych warunkach przewietrzania co wynika z oddziaływania bardzo gęstej i stosunkowo wysokiej zabudowy. W rejonie Kurdwanowa, Bieżanowa-Prokocimia, północnej części miasta oraz rejonu Nowej Huty warunki przewietrzania są lepsze niż w centrum, ale wartości wskaźnika FAI wskazują na znaczący wpływ zabudowy. Są to tereny z wysokimi blokami (11 kondygnacji), jednak większe odległości między budynkami w porównaniu do ścisłego centrum powodują nieco lepsze warunki przewietrzania. Doliny rzeczne (Wisły, Rudawy) oraz duże przestrzenie otwarte (np. Błonia) pozwalają na niezaburzony przepływ powietrza. Dogęszczanie zabudowy miejskiej powoduje obniżenie zdolności przewietrzania danego obszaru miasta, co zostało ilościowo pokazane we wspomnianym opracowaniu m.in. na przykładzie nowego osiedla Avia w Czyżynach.

Szczególnym przypadkiem wiatru jaki czasem wieje w Krakowie jest wiatr halny. Jest to jeden z tzw. wiatrów regionalnych, występuje w Tatrach, ale może docierać do Krakowa a nawet jeszcze dalej na północ. Jak się okazuje, może także mieć bardzo różny wpływ na zanieczyszczenie powietrza w Krakowie. Jest to wiatr suchy, ciepły i może być porywisty. Jeśli halny wieje ponad doliną Wisły dalej na północ, a w dolinie utworzyło się zastoisko chłodnego powietrza to taki strumień ciepłego powietrza ponad miastem generuje silną inwersję temperatury, bardzo złe warunki dyspersji zanieczyszczeń i wysokie ich stężenia w całym mieście. Jeśli wiatr halny wnika w dolinę Raby, a następnie doliną Wisły dotrze do Krakowa od strony wschodniej albo wnika od południa do doliny Wisły w Krakowie to może zlikwidować zastoisko chłodnego powietrza, polepszyć naturalne przewietrzanie i w krótkim czasie doprowadzić do znacznego spadku stężeń zanieczyszczeń powietrza w całym mieście. Jest jeszcze trzecia możliwość: halny może generować zaburzenia przepływu powietrza zwane falami grawitacyjnymi. Wnikają one w zachodnią, węższą część doliny Wisły i powodują duże różnice w warunkach dyspersji na terenie miasta, skutkiem czego w jednych częściach Krakowa stężenia zanieczyszczeń szybko spadają a w innych szybko rosną (Sekula i in. 2021).

Badania bioklimatyczne prowadzono w Krakowie już w latach 30. XX w., natomiast w okresie powojennym ważnym syntetycznym opracowaniem była praca Hessa, Niedźwiedzia i Obrębskiej-Starkłowej (1989). Porównano w niej wybrane wskaźniki bioklimatyczne (temperatury efektywne TE i NTE, temperaturę ekwiwalentną i entalpię) w centrum miasta i poza nim. Stwierdzono, że największe różnice w warunkach bioklimatycznych w centrum miasta i poza nim są spowodowane adwekcją (czyli napływem) mas powietrza z południa, południowego zachodu i zachodu zarówno przy sytuacjach wyżowych, jak i niżowych. W latach 90. XX w. bioklimatem Krakowa zajmowali się także D. Limanówka (1991), która analizowała ekstremalne warunki bioklimatyczne w rejonie Krakowa, A. Mrocza (1992, 1996), który badał zróżnicowanie czasowe i przestrzenne wybranych wskaźników biometeorologicznych oraz ich aspekty turystyczno-rekreacyjne, a także A. Bokwa (1994), która stwierdziła, że w półroczu chłodnym w Krakowie panują dobre i bardzo dobre warunki bioklimatyczne do uprawiania turystyki; jedynie druga i trzecia dekada grudnia, czyli okres świąt Bożego Narodzenia i Nowego Roku, charakteryzują się stosunkowo najgorszymi warunkami. Z punktu widzenia wieloletniej charakterystyki bioklimatu Krakowa, te prace mają już charakter historyczny z uwagi na postępującą zmianę klimatu. Natomiast zaobserwowane różnice przestrzenne na obszarze miasta nadal mogą być cenną wskazówką do wyznaczania obszarów o różnym obciążeniu mechanizmów termoregulacyjnych człowieka.

Występowanie ekstremalnych fal upałów w obszarach zurbanizowanych jest obecnie jednym z głównych czynników pogarszających jakość życia mieszkańców miast, obok zagrożenia powodziowego i gwałtownych wichur. Fale upałów powodują szereg negatywnych skutków dla samopoczucia i zdrowia mieszkańców miast – szczególnie w grupach wrażliwych (osoby starsze, chore i dzieci) (Arsad i in. 2022). Jednak sama wysoka temperatura powietrza nie jest jedynym miernikiem warunków bioklimatycznych. Opisywane w literaturze naukowej rozwiązania redukujące dyskomfort termiczny w czasie fali upałów w miastach są analizowane zazwyczaj w odniesieniu do kilkupoziomowych skal stresu termicznego, które są ustalane w oparciu o kompleksowe wskaźniki biometeorologiczne oraz badania bilansu cieplnego człowieka. Od połowy XX w. w badaniach nad komfortem termicznym człowieka zarówno we wnętrzach jak i w otwartej przestrzeni zaproponowano szereg kompleksowych wskaźników stresu cieplnego (de Freitas, Grigorieva 2015). W obliczeniach brane są pod uwagę takie elementy meteorologiczne jak prędkość wiatru, temperatura i wilgotność powietrza, promieniowanie słoneczne itp. Wskaźniki te dzielą się na te odnoszące się do zasad wymiany ciepła między ciałem człowieka a otoczeniem, oparte na bilansie cieplnym ciała człowieka oraz te odwołujące się do fizjologii organizmu ludzkiego

i wyznaczaniu skal odczucia różnych warunków pogodowych za pomocą eksperymentów i ankiet przeprowadzanych na grupach ochotników. Do najczęściej stosowanych wskaźników oceny obciążeń cieplnych człowieka należą wskaźniki PET (Physiological Equivalent Temperature, Höppe 1999) oraz UTCI (Universal Thermal Climate Index, Błażejczyk i in. 2010), a badania wskazują, że bywają one dość często skorelowane ze sobą (Zare i in. 2018). Physiological Equivalent Temperature (PET), czyli ekwiwalentna temperatura fizjologiczna, jest jednym z najczęściej używanych wskaźników do pomiaru stresu cieplnego i jest obliczana przy wykorzystaniu równania bilansu cieplnego człowieka, zastosowanego w modelu MEMI (Munich Energy Model for Individuals; monachijski model energetyczny dla jednostki). Wskaźnik PET jest definiowany jako temperatura izotermicznego środowiska referencyjnego (bez wiatru i promieniowania słonecznego, o ciśnieniu pary wodnej 12 hPa), w której bilans cieplny człowieka utrzymuje temperaturę wewnętrzną i temperaturę skóry na takim samym poziomie jak w warunkach rzeczywistych.(Błażejczyk, Kunert 2011). W ten sposób PET umożliwia laikowi porównanie całłościowych efektów złożonych warunków termicznych na zewnątrz z jego własnym doświadczeniem (Höppe 1999). Zapewnienie cienia, wilgotności i ruchu powietrza może obniżać poziom stresu termicznego latem mierzony wielkością współczynnika PET. Wartości PET interpretuje się wg następującego schematu (wg Égerházi i Kántor 2011):

$PET < 4^{\circ}\text{C}$: ekstremalny stres zimna

$4^{\circ}\text{C} < PET < 8^{\circ}\text{C}$: silny stres zimna

$8^{\circ}\text{C} < PET < 13^{\circ}\text{C}$: umiarkowany stres zimna

$13^{\circ}\text{C} < PET < 18^{\circ}\text{C}$: słaby stres zimna

$18^{\circ}\text{C} < PET < 23^{\circ}\text{C}$: komfort cieplny

$23^{\circ}\text{C} < PET < 29^{\circ}\text{C}$: słaby stres ciepła

$29^{\circ}\text{C} < PET < 35^{\circ}\text{C}$: umiarkowany stres ciepła

$35^{\circ}\text{C} < PET < 41^{\circ}\text{C}$: silny stres ciepła

$PET > 41^{\circ}\text{C}$: ekstremalny stres ciepła

Z kolei uniwersalny wskaźnik obciążeń cieplnych (UTCI) (Błażejczyk i in. 2010), bierze pod uwagę średnią temperaturę promieniowania (Mrt) równą temperaturze powietrza (brak promieniowania słonecznego i cieplnego), prędkość wiatru na wysokości 10 m nad gruntem (v_{10}), równą 0,5 m/s, względną prędkość ruchu powietrza (v') związaną z poruszaniem się, równą 1,1 m/s, ciśnienie pary wodnej (v_p) odpowiadające 50% wilgotności względnej (przy temperaturze $< 29^{\circ}\text{C}$) i równe 20 hPa przy temperaturze wyższej od 29°C .

Przyjęto także stałe parametry fizjologiczne: metaboliczną produkcję ciepła (M) równą 135 W/m² (co odpowiada marszowi z prędkością 4 km na godzinę), izolacyjność termiczną odzieży (I_{cl}) proporcjonalną do rzeczywistych warunków termicznych i wietrznych. Jest definiowany jako ekwiwalentna temperatura powietrza, przy której w warunkach referencyjnych podstawowe parametry fizjologiczne organizmu przyjmują takie same wartości jak w warunkach rzeczywistych. Zakłada się zatem, że wymiana ciepła między człowiekiem a otoczeniem zależy tylko od temperatury powietrza (t), przy stałym poziomie pozostałych parametrów meteorologicznych. Aby określić taką właśnie temperaturę powietrza, trzeba w pierwszej kolejności obliczyć bilans cieplny człowieka w warunkach rzeczywistych. Następnie przyjmując stałe warunki referencyjne należy metodą kolejnych przybliżeń znaleźć taką temperaturę powietrza, przy której parametry fizjologiczne przyjmą takie same wartości jak w warunkach rzeczywistych (Błażejczyk, Kunert 2011). Skala oceny stresu termicznego w odniesieniu do wskaźnika UTCI nie opiera się na subiektywnych odczuciach cieplnych, ale na obiektywnych zmianach parametrów fizjologicznych organizmu, zachodzących pod wpływem warunków środowiskowych. Wartości wskaźnika UTCI są zatem miarą obciążeń cieplnych organizmu i są wyrażone w stopniach Celsjusza (°C) – czyli w tych samych jednostkach co temperatura powietrza, ale nie są z nią tożsame. Wskaźnik UTCI jest odnoszony zarówno do stresu gorąca jak i ekstremalnego chłodu. W odniesieniu do tego wskaźnika opracowano podział na klasy odczuć cieplnych, które opisują najważniejsze reakcje organizmu na daną temperaturę oraz zalecenia jak chronić się przed upałem lub nadmiernym wychłodzeniem (Tab. 1).

Tabela 1. Skala oceny obciążeń cieplnych organizmu według wskaźnika UTCI

UTCI (°C)	Obciążenie cieplne	Sposób przeciwdziałania
> +46	Nieznosny stres ciepła	Niezbędne okresowe schładzanie organizmu, konieczne uzupełnianie płynów >0,5 l/godz. Należy unikać dużego wysiłku fizycznego.
+38 - +46	Bardzo silny stres ciepła	Konieczne okresowe korzystanie z pomieszczeń klimatyzowanych lub miejsc zacienionych, niezbędne uzupełnianie płynów >0,5 l/godz. Należy ograniczyć wysiłek fizyczny.
+32 - +38	Silny stres ciepła	Niezbędne uzupełnianie płynów 0,25 l/godz., pożądane korzystanie z miejsc zacienionych i okresowe zmniejszanie wysiłku fizycznego.
+26 - +32	Umiarkowany stres ciepła	Niezbędne uzupełnianie płynów 0,25 l/godz.

+9 - +26	Brak obciążeń cieplnych	Fizjologiczne procesy termoregulacji są wystarczające do zachowania komfortu cieplnego.
0 - +9	Łagodny stres zimna	Pożądane używanie rękawiczek i nakrycia głowy.
-13 - 0	Umiarkowany stres zimna	Należy zwiększyć wysiłek fizyczny oraz chronić kończyny i twarz przed wychłodzeniem.
-27 - -13	Silny stres zimna	Należy zwiększyć wysiłek fizyczny oraz chronić kończyny i twarz przed wychłodzeniem. Pożądane zwiększenie termoizolacyjności odzieży.
-40 - -27	Bardzo silny stres zimna	Należy zwiększyć wysiłek fizyczny oraz chronić kończyny i twarz przed wychłodzeniem. Niezbędne zwiększenie termoizolacyjności odzieży i ograniczenie czasu przebywania w terenie otwartym.
< -40	Nieznosny stres zimna	Czas przebywania ograniczyć do niezbędnego minimum. Niezbędne zwiększenie termoizolacyjności i wiatrochronności odzieży.

Źródło: Błażejczyk i in. 2010

Według najnowszych wyników badań wieloletnich zmian UTCI w Krakowie na podstawie pomiarów na Stacji Klimatologicznej IGiGP UJ w Ogrodzie Botanicznym, liczba dni o wysokim poziomie stresu cieplnego w Krakowie zgodnie ze wskaźnikiem UTCI wzrastała w ostatnich ośmiu dekadach o 2,6 dnia na 10 lat (Błażejczyk, Twardosz, 2023).

Podsumowując można stwierdzić, że główne cechy mezoklimatu Krakowa to:

- rzeźba terenu ma znaczący udział w kształtowaniu klimatu Krakowa, dlatego należy rozpatrywać mezoklimat Krakowa, czyli zjawiska i wartości elementów meteorologicznych w samym Krakowie i na terenach otaczających, w obrębie form terenu zajmowanych przez miasto;
- pole temperatury omawianego terenu jest kształtowane przez oddziaływanie zabudowy miejskiej (zjawisko MWC), tworzenie się poza miastem w dnie doliny zastojów chłodnego powietrza, spływy katabatyczne i inwersje temperatury powietrza;
- maksymalna intensywność MWC występuje latem, w nocy, przy pogodzie radiacyjno-insolacyjnej i w dnie doliny dla zwartej zabudowy śródmiejskiej może wynosić 6°C;
- średnia roczna liczba dni upalnych jest największa na terenach z zabudową blokową i willową w zachodniej części miasta w dnie doliny i sięga 35-40 dni/rok;

- najwięcej nocy tropikalnych występuje w centrum miasta i w kanionach miejskich, do 10 rocznie, a najmniej poza miastem w terenach objętych zastoiskami chłodnego powietrza i spływami katabatycznymi;
- Jeśli do końca XXI w. wzrost emisji CO₂ będzie umiarkowany to średnia liczba dni gorących dla całego terenu miasta ($t_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$) wzrośnie z 20 dni/rok (dane dla okresu 1971-2000) do 38 dni/rok (prognoza dla 2071-2100), przy czym warto zaznaczyć, że wartości te są znacznie zróżnicowane przestrzennie na terenie miasta; 1971-2000: min. 4, maks. 61 dni/rok, 2071-2100: 15 i 78 dni/rok. Jeśli wzrost emisji CO₂ będzie bardzo intensywny to dla okresu 2071-2100 wartość średnia jest prognozowana na poziomie 59 dni/rok, min. 29 a maks. 100 dni/rok. W przypadku nocy tropikalnych (temperatura minimalna $\geq 20^{\circ}\text{C}$) dla okresu 1971-2000 wartości minimalna, maksymalna i średnia to 0, 9 i 2 nocy/rok, dla umiarkowanego wzrostu emisji: 3, 20 i 9 nocy/rok, a dla intensywnego wzrostu emisji 12, 38 i 23 noc/rok
- dni z mgłą jest około 20 w roku, a jej występowanie zmniejsza intensywność MWC o ok. 1°C ;
- opady atmosferyczne wykazują duże zróżnicowanie przestrzenne generowane przez rzeźbę terenu. Roczne sumy opadu są najwyższe w południowej części miasta, a najwięcej dni z opadem w roku występuje w centrum miasta;
- prędkość wiatru w Krakowie sporadycznie przekracza 4 m/s, z uwagi na naturalne osłonięcie od wiatru przez wypukłe formy terenu otaczające miasto i oddziaływanie zabudowy miejskiej, co oznacza bardzo słabe naturalne warunki przewietrzania miasta

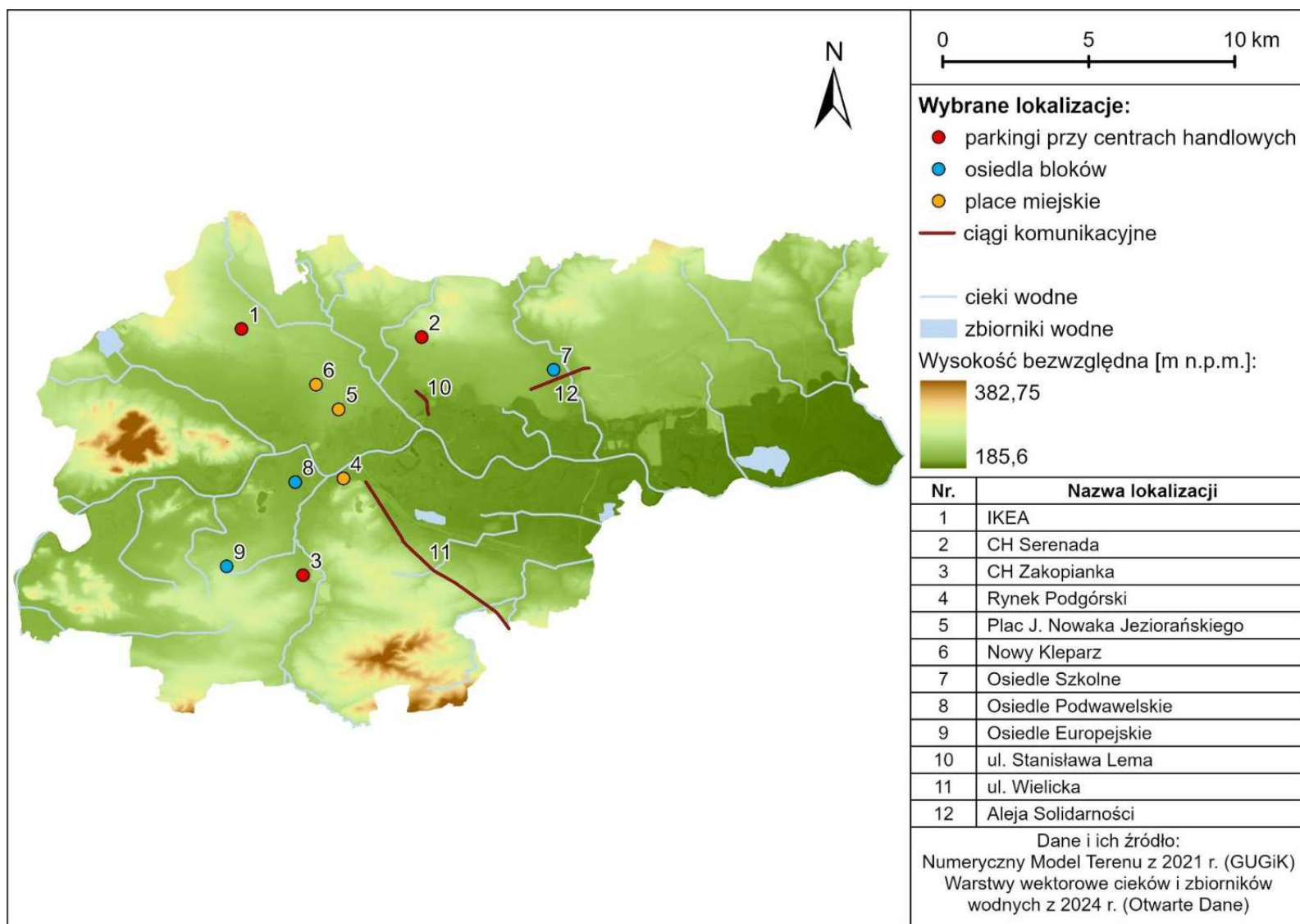
Główne cechy bioklimatu Krakowa okresu letniego i zimowego to:

- obciążenie ciepłem w czasie fal upałów i występowania dni upalnych jest na terenie miasta bardzo zróżnicowane: największe w dnie doliny, czyli we wklęsłej formie terenu w obszarach intensywnie zabudowanych;
- Kraków ma złe naturalne warunki przewietrzania, wynikające z oddziaływania rzeźby terenu i zabudowy miejskiej, co sprzyja tworzeniu się inwersji termicznych i skutkuje złymi warunkami rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń powietrza, a to prowadzi do przekraczania dopuszczalnych stężeń zanieczyszczeń, zwłaszcza w okresie zimowym;
- występowanie w Krakowie prawie cały rok małych prędkości wiatru lub ciszy atmosferycznych oznacza w okresie letnim zwiększenie zagrożenia przegrzaniem organizmu człowieka w czasie występowania wysokiej temperatury powietrza.

2. Czynniki kształtujące klimat lokalny i bioklimat w świetle postępującej zmiany klimatu

Niniejsze opracowanie dotyczy możliwości poprawy, czyli melioracji klimatu i bioklimatu Krakowa poprzez wykorzystanie infrastruktury zielonej. Biorąc pod uwagę cechy mezoklimatu Krakowa opisane w poprzednim rozdziale konieczne jest rozpoznanie co te cechy kształtuje i w jakim zakresie można takie czynniki modyfikować, a także jaka jest ich rola w modyfikacjach klimatu w mikroskali i skali klimatu lokalnego. Wszystkie modele klimatyczne przewidują wzrost częstości i intensywności ekstremalnych zjawisk pogodowych w przyszłości. Z punktu widzenia niniejszego opracowania istotny jest przewidywany wzrost częstości występowania fal upałów, a także możliwe zwiększenie długości ich trwania oraz możliwe występowanie znacząco wyższych wartości temperatury maksymalnej niż dotychczas. Działania związane z wykorzystaniem infrastruktury zielonej, przedstawione w dalszej części opracowania, zostały zaplanowane dla wybranych lokalizacji, które jednak są reprezentatywne dla wielu terenów miasta. Poniżej zaprezentowano zatem rozkład przestrzenny wybranych cech obszaru Krakowa, ważnych dla kształtowania jego mezoklimatu i warunków mikroklimatycznych, a na rycinach zaznaczono lokalizację miejsc, gdzie planowane są wspomniane działania.

Jak zostało wcześniej wspomniane, rzeźba terenu odgrywa w Krakowie znaczącą rolę w kształtowaniu mezoklimatu miasta. Według najnowszego podziału fizycznogeograficznego Polski (Solon i in. 2018) północny obszar miasta Krakowa położony jest w podprowincjach: Wyżyna Śląsko-Krakowska i Wyżyna Małopolska, należących do prowincji Wyżyn Polskich. Środkowa część miasta leży w podprowincji Podkarpacie Północne, zaś południowa - w podprowincji Zewnętrzne Karpaty Zachodnie. Takie zróżnicowane ukształtowanie terenu powoduje, że badania klimatologiczne na obszarze Krakowa muszą uwzględniać oddziaływanie trzech różnych jednostek o układzie równoleżnikowym, tj. dolinę Wisły wraz z dolinami jej dopływów oraz skłon wyżyny na północy i pogórza, wchodzące w skład Karpat, na południu (Bokwa 2010). Lokalizacje wybrane do działań w zakresie infrastruktury zielonej są położone w każdym z wyżej wymienionych obszarów (ryc. 1). W punktach położonych w dnie doliny można się spodziewać największego obciążenia ciepłem w lecie w trakcie upałów, co jest cechą wklęsłych form terenu, zatem tam działania zaradcze są szczególnie potrzebne. Natomiast na obszarach położonych w północnej części miasta muszą być brane pod uwagę niższe sumy opadów niż w pozostałych częściach miasta, wynikające z położenia w cieniu opadowym, co oznacza gorszą naturalną dostępność wody dla roślin.



Ryc. 1. Mapa hipsometryczna oraz ciekі i zbiorniki wodne na obszarze Krakowa

W badaniach lokalizacji, stanu i kondycji roślinności na obszarach miast często stosowany jest znormalizowany różnicowy wskaźnik wegetacji, zwany w skrócie NDVI (ang. *Normalized Difference Vegetation Index*). Oblicza się go analizując zdjęcia satelitarne i bazując na wykorzystaniu różnicy w odbijaniu promieniowania w zakresie pasma bliskiej podczerwieni i pochłanianiu w zakresie pasma czerwieni przez powierzchnię czynną, czyli powierzchnię roślin “widzianą” przez satelitę (Rouse i in. 1973b). Wskaźnik ten oblicza się ze wzoru:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

gdzie:

NDVI – wartość wskaźnika NDVI,

NIR – wartość odbicia promieniowania bliskiej podczerwieni,

R – wartość odbicia promieniowania czerwonego.

Wskaźnik NDVI przyjmuje wartość od –1 do 1. Wartości ujemne i bliskie zera są charakterystyczne dla obszarów wodnych, pokrytych śniegiem lub chmur. Wartości dodatnie są tym wyższe, im gęstsza, zdrowsza i bujniejsza roślinność porasta badany obszar (Wang i in. 2004) oraz im aktywniej zachodzi na badanym obszarze fotosynteza (Rouse i in. 1973a). Analizę wskaźnika NDVI przeprowadzono dla okresu od maja do sierpnia 2022 r., czyli w szczycie aktywności fotosyntetycznej roślin, bowiem wartość wskaźnika NDVI jest dla tego samego obszaru zmienna w zależności od momentu cyklu fenologicznego (Wang i in. 2003). W obrębie granic administracyjnych Krakowa widoczne jest wyraźne zróżnicowanie wskaźnika NDVI (ryc. 2), szczególnie niskie wartości występują w obrębie historycznego centrum miasta (dzielnice: Stare Miasto, Grzegórzki), dużych osiedli mieszkaniowych (m.in. w obrębie dzielnic: Krowodrza, Bieżanów-Prokocim, Czyżyny, Podgórze Duchackie, Bronowice, Prądnik Czerwony), obszarów przemysłowych (kombinat w Nowej Hucie, obecnie ArcelorMittal Poland Oddział w Krakowie) oraz dużych kompleksów handlowo-usługowych (np. CH Zakopianka i okolica, okolice M1 i EXPO Kraków). Wysokie wartości NDVI charakteryzują wiele terenów zwłaszcza w zachodniej i południowo-zachodniej części miasta, gdzie znajduje się wiele obszarów z zielenią wysoką (m.in. Las Wolski, Las Borkowski) oraz obszary przedmieść o mało zwartej zabudowie, z dużą ilością obszarów pokrytych roślinnością (np. Swoszowice). Dodatkowo, zastosowanie uśrednionego wyniku ze zobraowań

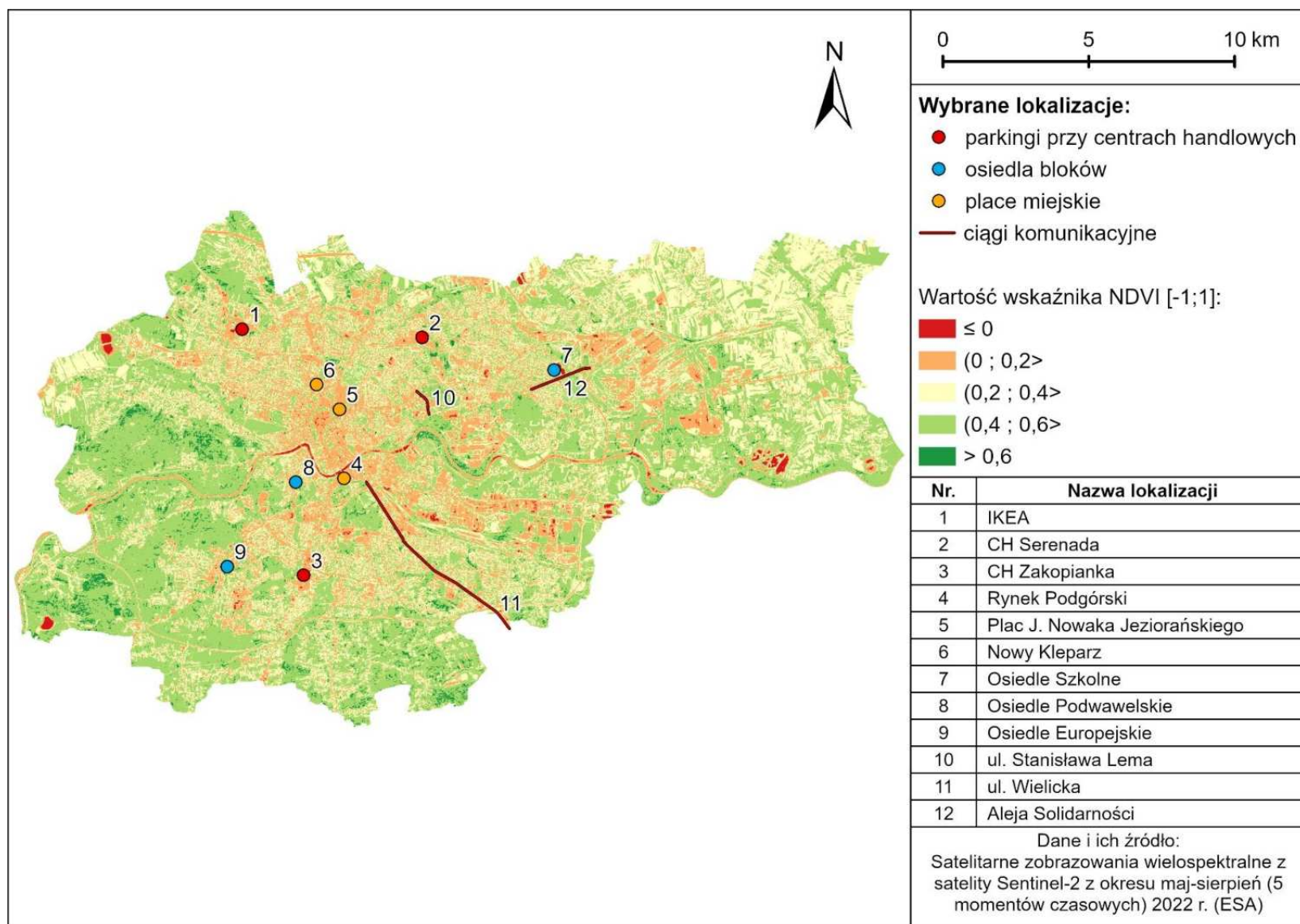
satelitarnych z 5 momentów czasowych, od maja do sierpnia 2022 r., pozwoliło na widoczne wyodrębnienie obszarów rolniczych, położonych na wschodzie i północnym-wschodzie Krakowa (w obszarze dzielnic: Wzgórza Krzesławickie i Nowa Huta).

Uśrednienie wskaźnika NDVI dla poszczególnych dzielnic administracyjnych Krakowa (ryc. 3) wykazało duże zróżnicowanie tego wskaźnika. Najwyższe wartości cechują dzielnice położone na granicy miasta, szczególnie dzielnice w południowo-zachodniej części miasta, które charakteryzują się dużym udziałem zieleni wysokiej: Zwierzyniec, Dębniki i Swoszowice. Najmniejsze wartości wskaźnika NDVI występują w dzielnicach w centrum miasta: Stare Miasto, Grzegórzki, Krowodrza i Prądnik Czerwony. Poza ścisłym centrum miasta, uśrednione wartości NDVI dla dzielnic raczej są wyższe niż 0,3. Spowodowane jest to faktem, że bardzo często, zarówno w obszarach zabudowy willowej, jak również w obrębie osiedli bloków mieszkalnych, pomiędzy budynkami mieszkalnymi wkomponowane są choćby niewielkie obszary zieleni. Na obszarze Krakowa poza ścisłym centrum bardzo rzadko występują obszary bardzo zwartej zabudowy mieszkaniowej, bez udziału zieleni. Warto zauważyć jednak, że problem braku zieleni często cechuje duże obszary przemysłowe i kompleksy handlowo-usługowe na obszarze Krakowa. Występowanie obok siebie tak zróżnicowanych powierzchni jest korzystne z bioklimatycznego punktu widzenia, gdyż każda z nich inaczej reaguje na docierające promieniowanie słoneczne i inaczej kształtuje temperaturę powietrza znajdującego się nad daną powierzchnią. Ma to znaczenie zwłaszcza w gorące, słoneczne i bezwietrzne dni, kiedy nawet niewielkie różnice temperatury powietrza na relatywnie małym terenie skutkują niewielkimi różnicami lokalnymi ciśnienia i przepływem powietrza, co polepsza nieco warunki biotermiczne.

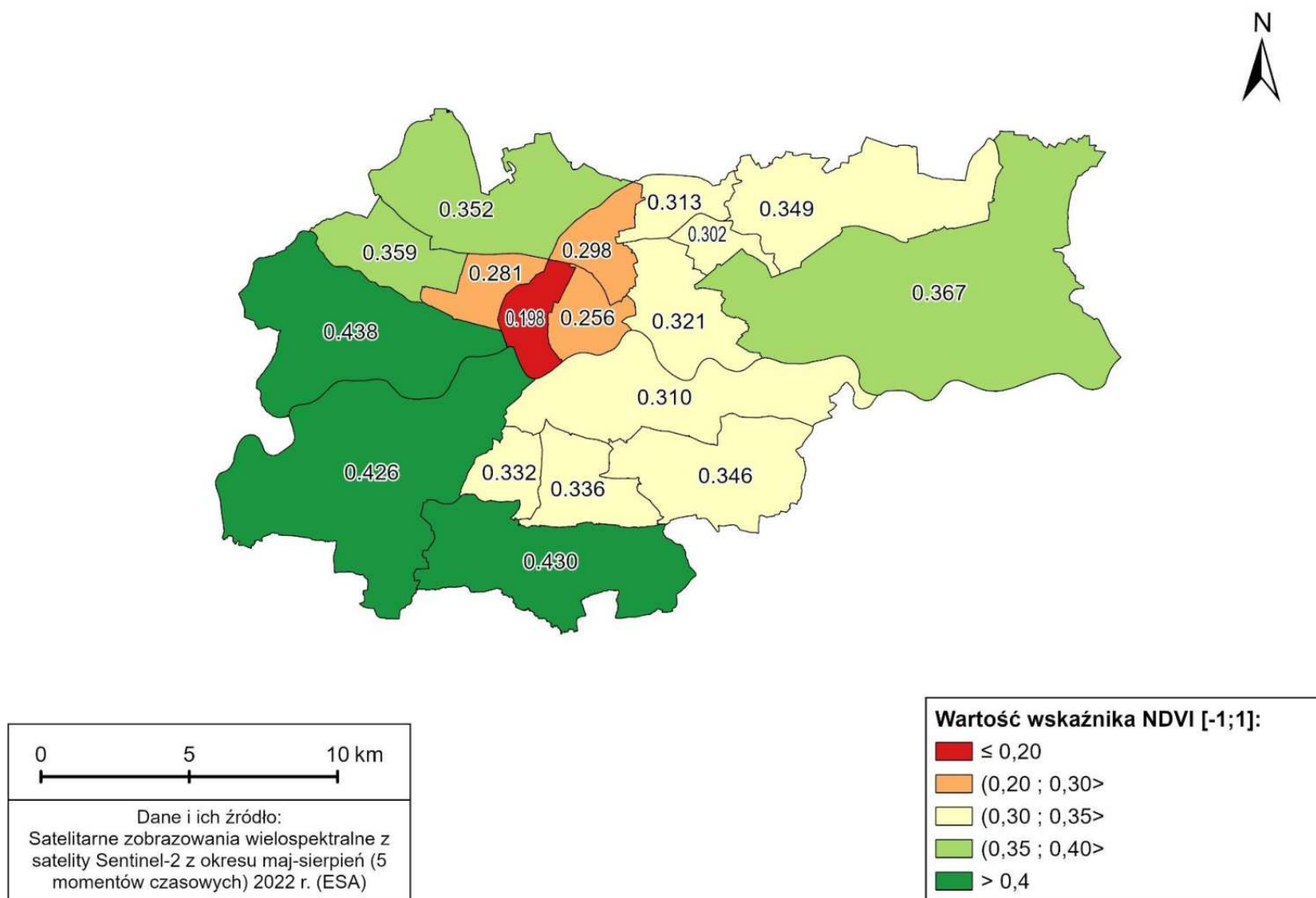
Procentowy udział poszczególnych klas wartości wskaźnika NDVI, zaprezentowanych na rycinie 2, wyraźnie wykazuje na duży odsetek obszarów o niskich wartościach wskaźnika NDVI (od 0 do 0,2) w dzielnicach centralnych: Stare Miasto, Grzegórzki, Krowodrza (tab. 2). Warto również zauważyć, że, wbrew obiegowej opinii, w Krakowie zjawisko zwanej potocznie “betonozy”, czyli silnego przekształcania obszarów miasta bez udziału zieleni, jest ograniczone do konkretnych obszarów, a nie powszechne. Nieco ponad ¼ obszaru miasta została zakwalifikowana jako obszar o silnej antropopresji (wartość wskaźnika NDVI od 0 do 0,2), z czego większość tych obszarów leży w obrębie trzech centralnych dzielnic. Aż 31,9% powierzchni miasta stanowią obszary o nieco ograniczonej aktywności fotosyntezy, których wartość wskaźnika NDVI wynosi od 0,2 do 0,4. Zaś aż 40% powierzchni w granicach administracyjnych Krakowa wykazało wartość wskaźnika NDVI na poziomie od 0,4 do 0,6,

który cechuje obszary o stosunkowo dużej, jak na obszar miejski, aktywności fotosyntezy. 1,8% powierzchni Krakowa wykazuje wartości wskaźnika NDVI powyżej 0,6.

Wartość wskaźnika NDVI dla wybranych lokalizacji, gdzie mają być realizowane projekty zmian, prezentowane w dalszej części pracy zawiera się w przedziale od 0,158 do 0,324. Są to zatem obszary o silniej lub przeciętnej antropopresji.



Ryc. 2. Zróźnicowanie wskaźnika NDVI na obszarze Krakowa



Ryc. 3. Zróżnicowanie wskaźnika NDVI na obszarze Krakowa z podziałem na dzielnice administracyjne

Tabela 2. Procentowy udział poszczególnych przedziałów wartości wskaźnika NDVI dla dzielnic Krakowa

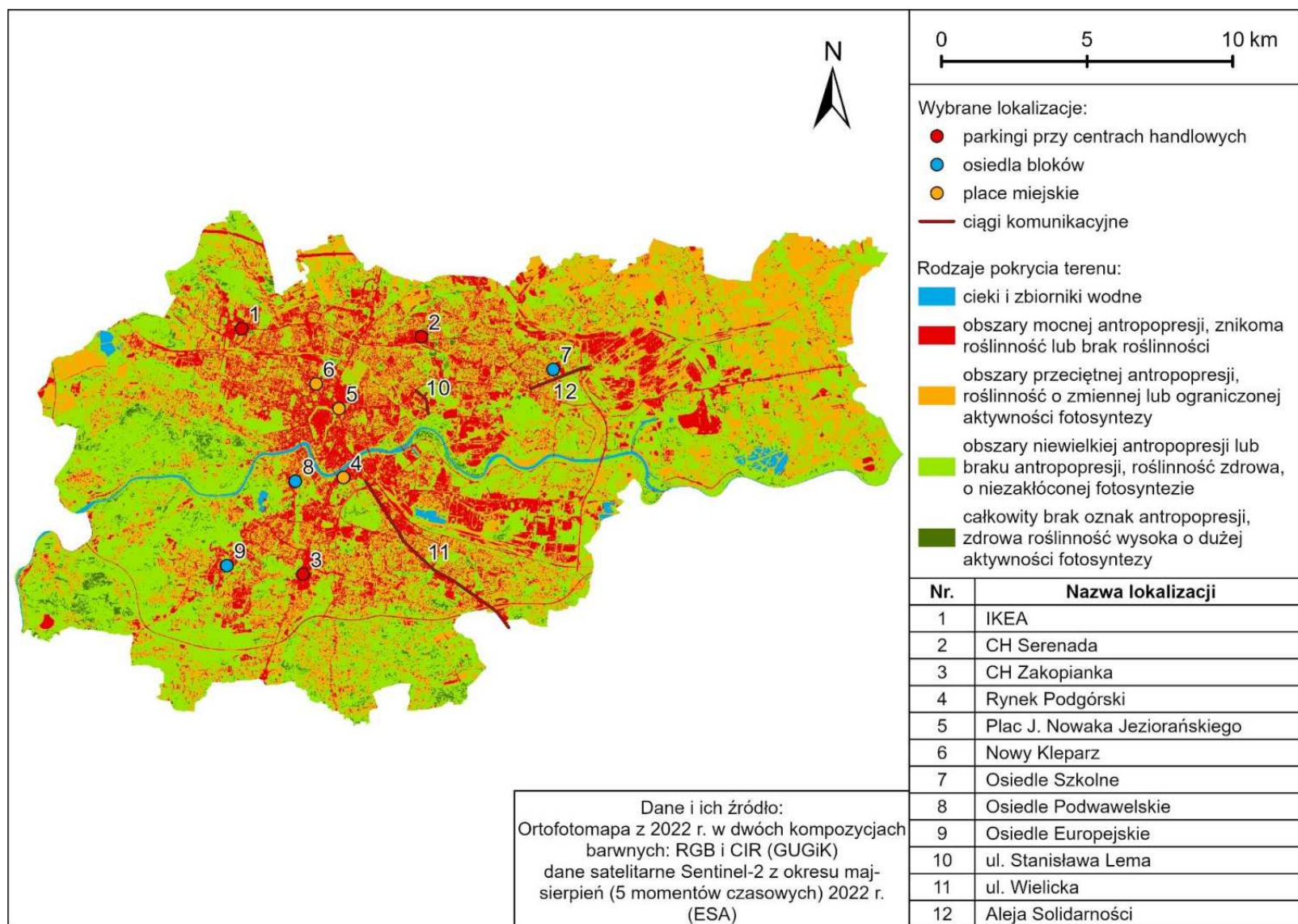
L. p.	Dzielnica	Wartość wskaźnika NDVI:				
		≤ 0	(0 ; 0,2>	(0,2 ; 0,4>	(0,4 ; 0,6>	> 0,6
1	Dzielnica I Stare Miasto	2,6	57,2	22,4	17,7	0,1
2	Dzielnica II Grzegórzki	2,6	41,0	32,4	23,6	0,4
3	Dzielnica III Prądnik Czerwony	0,0	31,4	38,9	28,7	1,0
4	Dzielnica IV Prądnik Biały	0,0	23,1	32,3	42,3	2,3
5	Dzielnica V Krowodrza	0,0	37,7	33,3	28,0	1,0
6	Dzielnica VI Bronowice	0,3	21,1	30,9	45,6	2,0
7	Dzielnica VII Zwierzyniec	2,3	6,2	24,3	62,1	5,1
8	Dzielnica VIII Dębniki	1,6	10,9	20,4	62,7	4,3
9	Dzielnica IX Łagiewniki-Borek Fałęcki	0,0	28,1	29,2	41,7	1,0
10	Dzielnica X Swoszowice	0,0	8,4	26,3	60,7	4,6
11	Dzielnica XI Podgórze Duchackie	0,0	24,2	36,0	37,7	2,1
12	Dzielnica XII Bieżanów-Prokocim	0,0	22,7	33,3	42,5	1,5
13	Dzielnica XIII Podgórze	4,3	28,8	25,9	39,4	1,6
14	Dzielnica XIV Czyżyny	2,0	30,0	26,5	39,0	2,6
15	Dzielnica XV Mistrzejowice	0,0	28,8	35,1	35,0	1,1
16	Dzielnica XVI Bieńczyce	0,0	30,6	36,7	32,1	0,6
17	Dzielnica XVII Wzgórza Krzesławickie	0,0	10,8	53,2	35,5	0,5
18	Dzielnica XVIII Nowa Huta	1,9	12,7	37,8	46,5	1,1
	Kraków	1,0	25,2	31,9	40,0	1,8

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych satelitarnych Sentinel-2 (ESA)

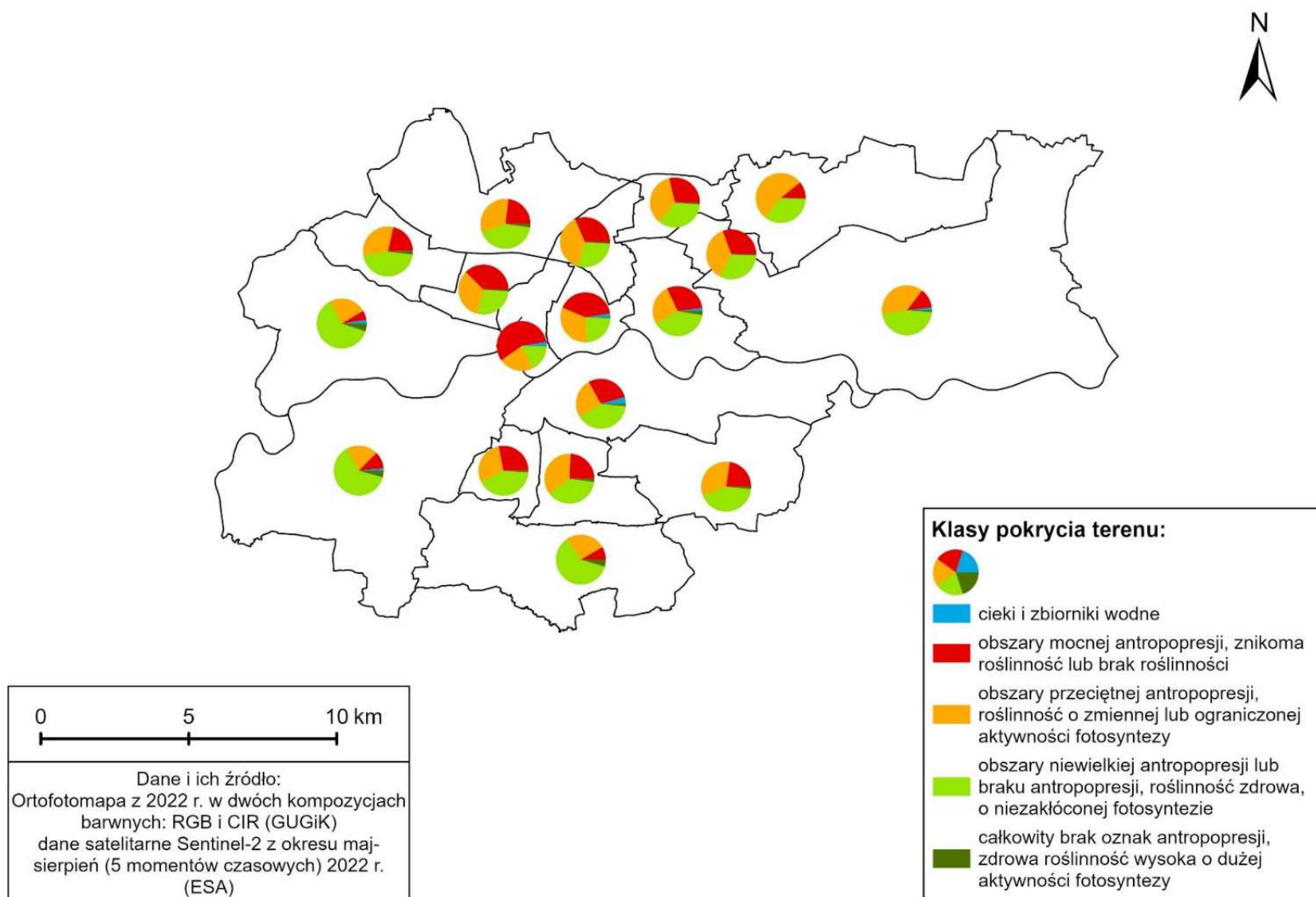
Aby uwidocznic złożoność zróżnicowania pokrycia terenu na obszarze Krakowa, wykonano klasyfikację pokrycia terenu miasta pod kątem antropopresji i pokrycia roślinnością (ryc. 4) na podstawie obliczonej dla okresu od maja do sierpnia 2022 r. uśrednionej wartości wskaźnika NDVI oraz ortofotomapy z 2022 r. w kompozycji barwnej RGB (barwy rzeczywiste) i CIR (barwy fałszywe) :

- obszary o silnej antropopresji są to obszary o wartości wskaźnika NDVI mniejszej lub równej 0,2. Obszary takie cechuje silnie przekształcony przez człowieka krajobraz i bardzo skąpa szata roślinna lub jej brak. Przykładem takich obszarów są m.in. ulice pozbawione zieleni lub z niewielkim pasem zieleni niskiej, hałdy odpadów przemysłowych (np. żużlu) czy duże parkingi w sąsiedztwie kompleksów handlowo-usługowych.
- obszary przeciętnej antropopresji są to obszary o wartości wskaźnika NDVI od 0,2 do 0,4. Tereny te, mimo wyraźnie widocznej antropopresji, posiadają, wkomponowane pomiędzy zabudowania i powierzchnie antropogeniczne (takie jak np. ulice, chodniki itp.), obszary pokryte roślinnością. Do tej kategorii zaliczają się również obszary o roślinności, której aktywność fotosyntezy jest niska (np. obszary zieleni niskiej), zaburzona (np. rośliny, które uszkodzone przez szkodniki lub choroby) lub zmienna (np. pola uprawne, na których roślinność znajduje się okresowo, do czasu zbioru).
- obszary niskiej lub braku antropopresji są to obszary, na których roślinność porasta większość powierzchni, o stosunkowo niewielkich przekształceniach dokonanych przez człowieka lub ich braku. Roślinność takich obszarów jest zdrowa, oprócz zieleni niskiej występują tam również zakrzaczenia lub zadrzewienia.
- obszary całkowitego braku antropopresji są to obszary, na których brak widocznych oznak działalności człowieka. Dominuje na nich zdrowa zieleń wysoka gatunków cechujących się wysokim wskaźnikiem aktywności fotosyntezy.

Procentowy udział poszczególnych klas pokrycia terenu dla poszczególnych dzielnic administracyjnych miasta Krakowa (ryc. 5) potwierdza wcześniejsze wnioski o dużym zróżnicowaniu obszaru miasta pod kątem wielkości powierzchni zajmowanych przez tereny zielone, ich składu gatunkowego oraz aktywności fotosyntezy.



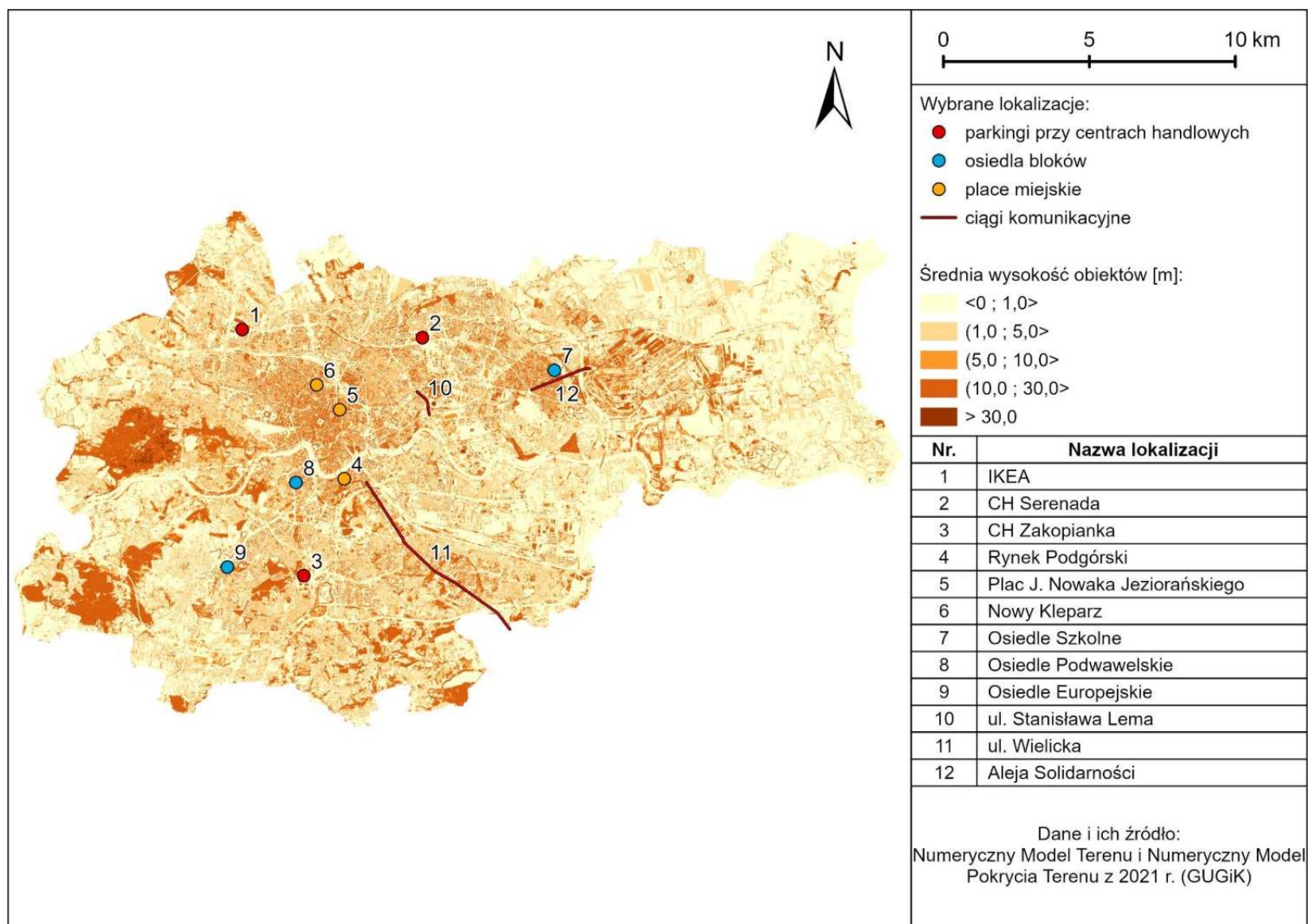
Ryc. 4. Klasyfikacja pokrycia terenu na obszarze Krakowa



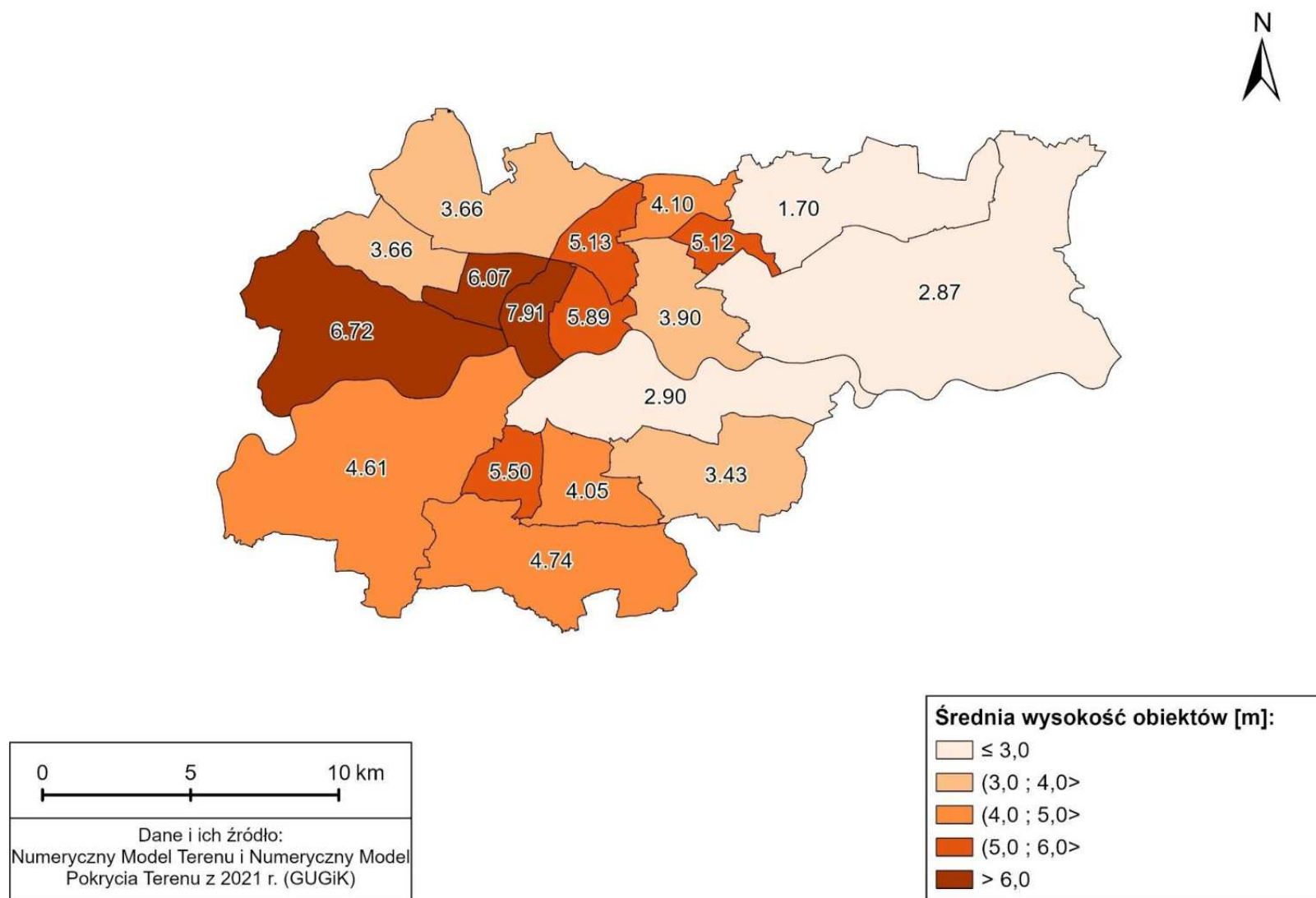
Ryc. 5. Procentowy udział klas pokrycia terenu na obszarze Krakowa z podziałem na dzielnice administracyjne

Rycina 6 pokazuje wysokość obiektów naziemnych na terenie miasta, niezależnie od tego czy są to elementy naturalne, np. drzewa, czy antropogeniczne, np. budynki. Rycina ta pokazuje, że na większości obszaru miasta znajdują się obiekty relatywnie wysokie, co z jednej strony utrudnia swobodny przepływ powietrza, utrudnia zatem rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń powietrza i pogarsza naturalne możliwości ochładzania w czasie upałów, ale generuje duże zacienienie, a z drugiej strony utrudnia wychładzanie się terenu miasta nocą co sprzyja występowaniu nocy tropikalnych. Obszary o wysokości pokrycia terenu poniżej 1 m stanowią 47,3% całkowitej powierzchni miasta. Obszary zajmowane przez obiekty naziemne o wysokości od 1 m do 5 m to 25,5% powierzchni miasta, od 5 m do 10 m – 12,7% powierzchni, od 10 m do 30 m – 14,2% powierzchni. Obszary o wysokości pokrycia terenu powyżej 30 m to 0,3% całkowitej powierzchni miasta. Dzielnice z najwyższą średnią wysokością obiektów to Dzielnica I Stare Miasto, Dzielnica V Krowodrza i Dzielnica VII Zwierzyńiec (ryc. 7). W przypadku Starego Miasta i Krowodrzy wysoka wartość jest spowodowana przez zabudowę (Stare Miasto – zabudowa staromiejska, Krowodrza – osiedla bloków mieszkalnych), zaś w przypadku Zwierzyńca - stosunkowo dużymi obszarami leśnymi, z dużym udziałem zieleni wysokiej. Najniższe wartości są charakterystyczne dla wschodniej części miasta: Dzielnicy XIII Podgórze, Dzielnicy XVIII Nowa Huta i Dzielnicy XVII Wzgórza Krzesławickie. Nowa Huta i Wzgórza Krzesławickie we wschodniej swojej części, to tereny w dużej części pokryte polami uprawnymi lub łąkami, o typie zabudowy bardziej przypominającym zabudowę wiejską niż miejską. Podgórze zaś, mimo zabudowy staromiejskiej w zachodniej części dzielnicy, obejmuje swoim obszarem niezabudowane trawiaste terasy w dolinie Wisły oraz duże połacie nieużytków we wschodniej części dzielnicy, które pokryte są w głównej mierze zielenią niską.

Przedział wartości średniej wysokości obiektów dla obszarów, gdzie planowane są zmiany, wynosi od 3,15 m do 8,12 m, czyli, porównując do przedziałów wartości klas średniej wysokości obiektów w dzielnicach, obejmuje prawie wszystkie kategorie, oprócz najniższej (ponieważ badane obszary to tereny zabudowane o stosunkowo wysokim stopniu antropopresji niemożliwym jest, aby średnia wysokość obiektów wynosiła na nich poniżej 3 m – taka średnia cechuje obszary o dużym odsetku gruntów wykorzystanych rolniczo, nieużytków lub łąk, czyli takich, które nie są przedmiotem niniejszego opracowania).



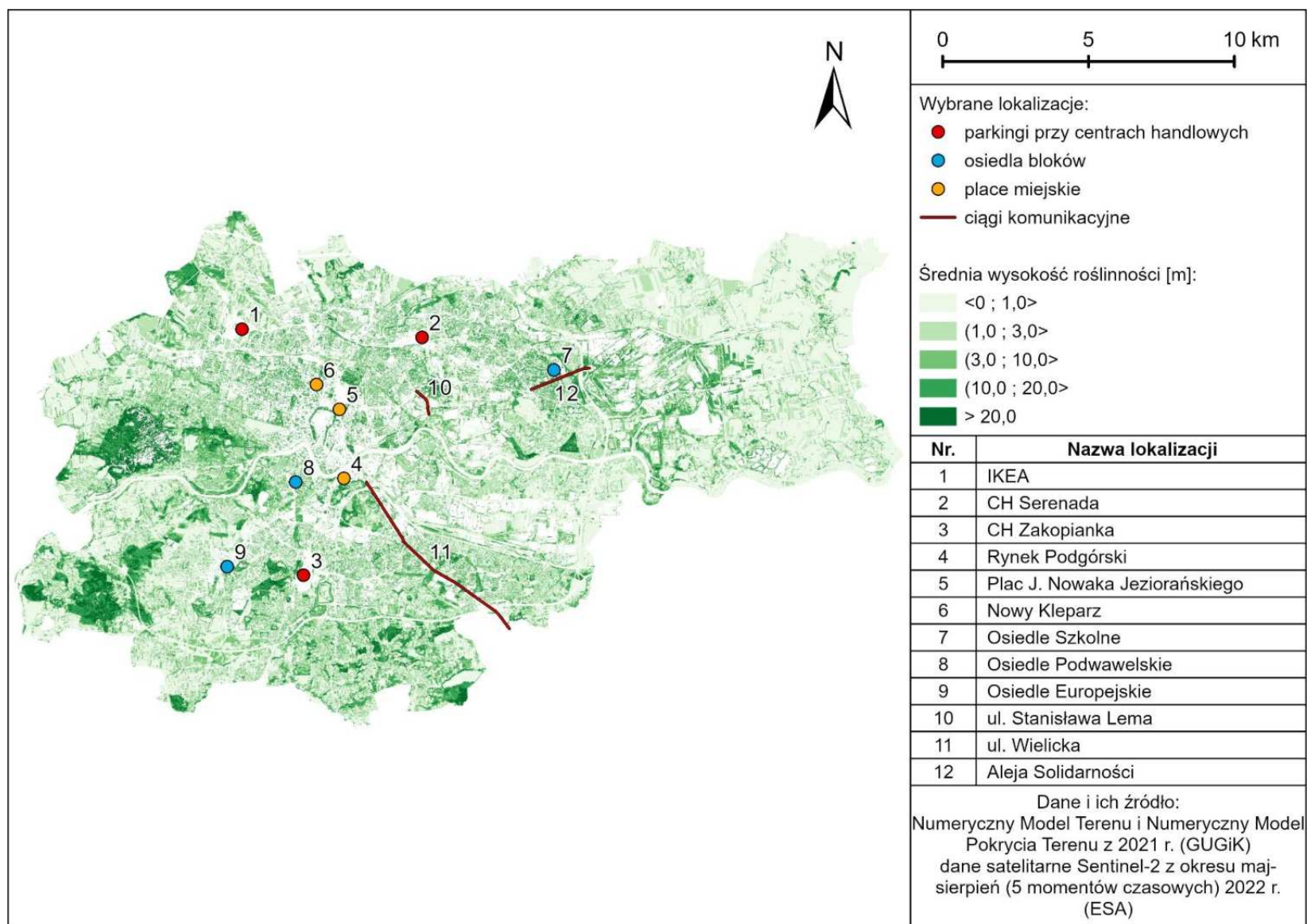
Ryc. 6. Średnia wysokość obiektów (zabudowa, roślinność) na obszarze Krakowa



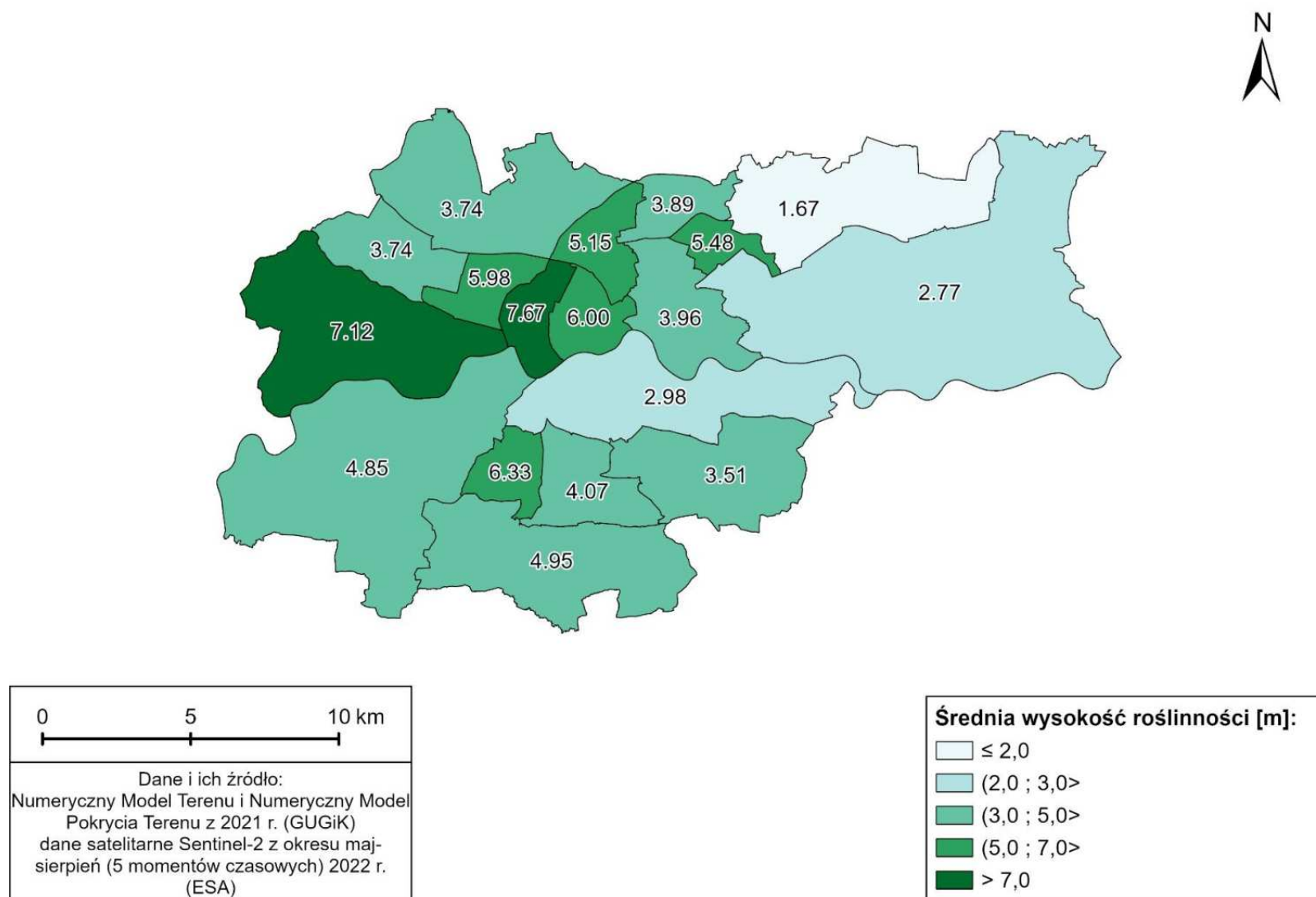
Ryc. 7. Średnia wysokość obiektów (zabudowa, roślinność) na obszarze Krakowa z podziałem na dzielnice administracyjne

Rycina 8, przedstawiająca wysokość roślinności na terenie Krakowa, uwidacznia, że zieleń o zróżnicowanej wysokości występuje na obszarze całego miasta i oddziela obszary o zwartej zabudowie. 45,8% powierzchni zielonych w Krakowie ma roślinność o wysokości nie większej niż 1 m. Wysokość roślin od 1 m do 3 m ma 17,6% powierzchni pokrytych zielenią miejską, od 3 m do 10 m 22,2% powierzchni, a od 10 m do 20 m 11,2%. Rośliny o wysokości przekraczającej 20 m stanowią 3,2% ogółu obszarów pokrytych roślinnością. Średnia wysokość obszarów zielonych jest najwyższa w dzielnicy Stare Miasto i Zwierzyniec (ryc. 9). W Dzielnicy I Stare Miasto tak wysoka średnia generowana jest przede wszystkim przez zabytkowy park Planty, który obejmuje powierzchnię około 21 ha. Ponadto, w obszarze Dzielnicy I znajduje się również park im. Jalu Kurka oraz Cmentarz Rakowicki, również stosunkowo gęsto pokryty drzewami. Poza tymi obszarami niewiele jest obszarów zielonych w obrębie tej dzielnicy. Natomiast na terenie Dzielnicy VII Zwierzyniec położony jest Las Wolski i las otaczający Kopiec Kościuszki. Średnią na obszarze tej dzielnicy obniżają obszary rolne położone na północny-zachód od Lasu Wolskiego. Najniższe wartości występują w dzielnicach: Wzgórza Krzesławickie, Nowa Huta i Podgórze. Jak już wcześniej wspomniano, niskie wartości w tych obszarach są wynikiem występowania tam dużych połaci obszarów rolniczych i nieużytków.

Średnia wysokość roślinności w wybranych do przeprojektowania obszarach wynosi od 1,89 m do 9,66 m, co pokrywa się z przedziałem wartości obliczonych średnich wysokości roślinności dla dzielnic administracyjnych Krakowa; można zatem uznać, że wybrane do analizy obszary są reprezentatywne.



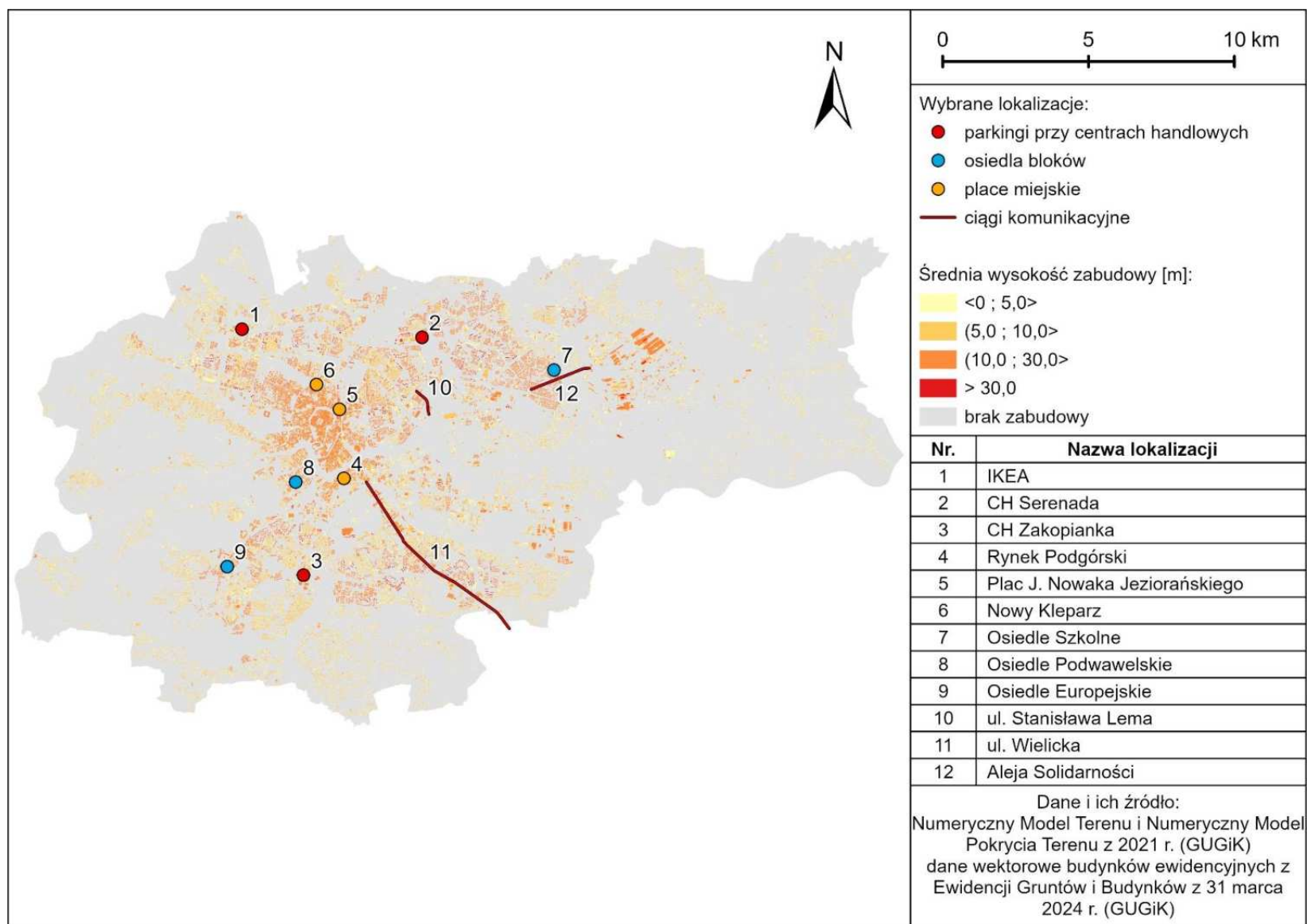
Ryc. 8. Średnia wysokość roślinności na obszarze Krakowa



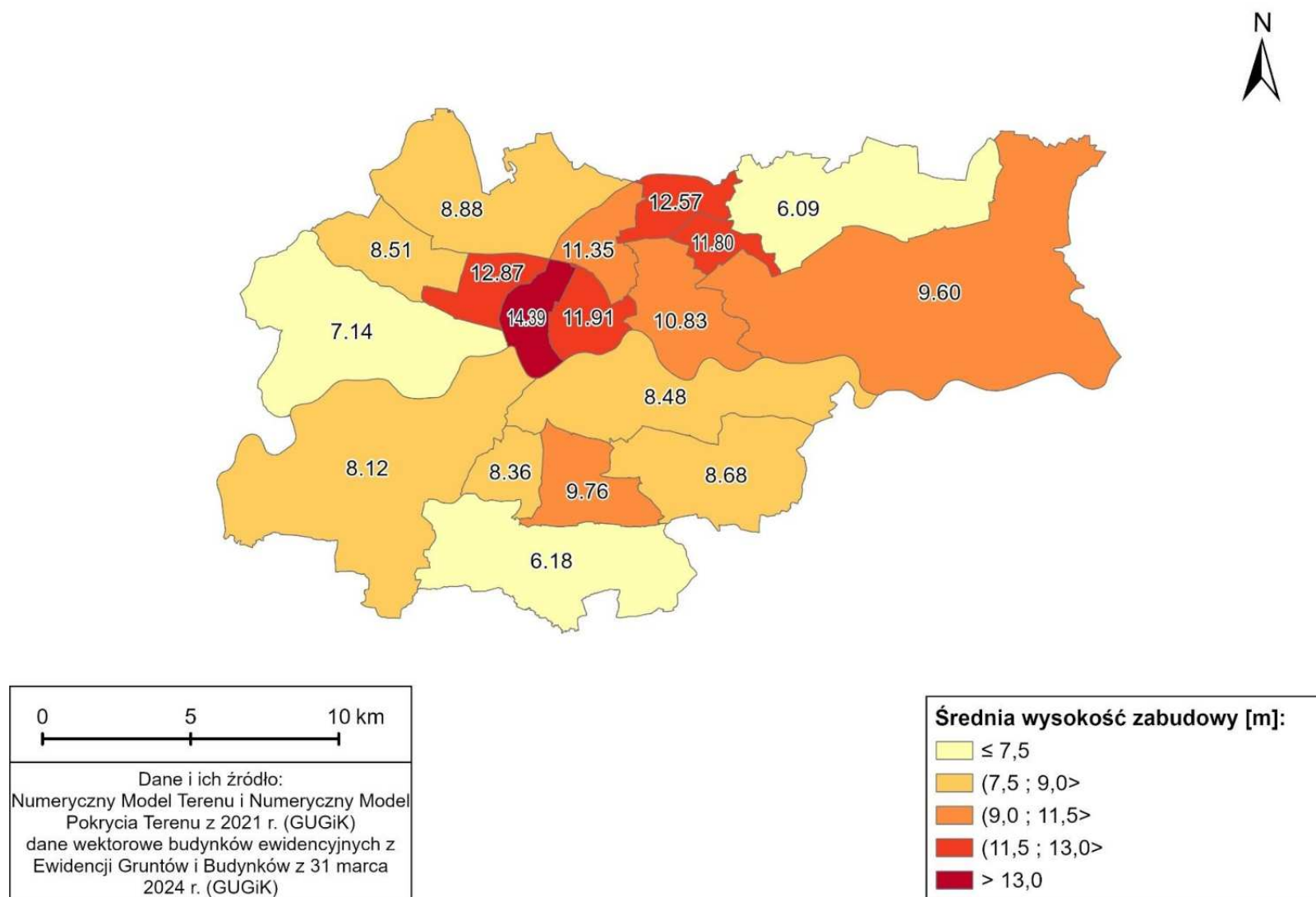
Ryc. 9. Średnia wysokość roślinności na obszarze Krakowa z podziałem na dzielnice administracyjne

Licząc powierzchnię zabudowy jako rzut poziomy budynków na powierzchnię terenu, zabudowa zajmuje 13,5% powierzchni miasta (ryc. 10). Z całego obszaru zabudowanego 27,5% to budynki o wysokości 0-5 m, 38,5% o wysokości 5-10 m, 32,1% o wysokości 10-30 m, zaś 1,9% to budynki o wysokości powyżej 30 m. Najwyższe wartości średniej wysokości zabudowy cechują dzielnice o dużym odsetku zabudowy staromiejskiej i osiedli bloków mieszkalnych: Stare Miasto, Krowodrza, Mistrzejowice, Grzegórzki i Bieńczyce (ryc. 11). Stosunkowo wysoka średnia występuje również w dzielnicach: Prądnik Czerwony, Czyżyny, Podgórze Duchackie i Nowa Huta. Ta ostatnia jest szczególnie ciekawa pod tym względem, ze względu na duże zróżnicowanie wartości średniej wysokości zabudowy pomiędzy częścią zachodnią z wybudowanymi w czasach PRL-u blokowiskami i byłym kombinatem, a częścią wschodnią, w której dominuje zabudowa typowo wiejska, w większości jedno- lub dwukondygnacyjna. Najniższe wartości przypadają na dzielnice na obrzeżach miasta z zabudową o charakterze podmiejskim (Swoszowice i zachodnia część Wzgórz Krzesławickich), willowym (Zwierzyniec), a częściowo nawet wiejskim (wschodnia część Wzgórz Krzesławickich).

Dla wybranych obszarów średnia wysokość zabudowy wynosi od 8,58 m do 15,72 m. Wybrane obszary są reprezentatywne w porównaniu do wartości średniej wysokości zabudowy obliczonej dla dzielnic administracyjnych, ponieważ wartości obliczone dla wybranych obszarów są takie same jak wartości przedziałów kategorii ustalonych dla średniej wysokości zabudowy w dzielnicach, oprócz najniższej (ponieważ badane obszary to tereny zabudowane o stosunkowo wysokim stopniu antropopresji niemożliwym jest, aby średnia wysokość obiektów wynosiła na nich poniżej 7,5 m – taka średnia cechuje obszary o dużym odsetku zabudowy podmiejskiej lub wiejskiej, w której przeważa zabudowa willowa).



Ryc. 10. Średnia wysokość zabudowy na obszarze Krakowa



Ryc. 11. Średnia wysokość zabudowy na obszarze Krakowa z podziałem na dzielnice administracyjne

3. Wpływ zieleni miejskiej na klimat lokalny miasta w świetle opracowań naukowych z kraju i zagranicy

W ostatnich 30 latach zintensyfikowano badania naukowe, które mają za zadanie sprawdzić jaki jest wpływ różnego typu terenów zieleni w miastach na ich klimat lokalny. Szczególnie duże nadzieje wielu badaczy pokłada w efekcie „chłodzenia”, jaki mają dawać parki i lasy miejskie oraz powierzchnie biologicznie czynne. Wśród zaleceń w zakresie adaptacji miast do zmian klimatu powtarzają się postulaty zachowania istniejących i zakładania nowych terenów zieleni, ograniczania powierzchni nieprzepuszczalnych (U.S. Environmental Protection Agency 2008, Leszczyński i in. 2023), wdrażania systemów błękitno-zielonej infrastruktury w różnej skali oraz podtrzymywania lub odtwarzania przestrzennej łączności systemów przyrodniczych (Komunikat... 2024). Badania analizujące efektywność zieleni jako czynnika obniżającego temperaturę powietrza w dzień dowodzą, że w obszarach „zielonych” temperatura powietrza jest niższa niż w zabudowanych, co wynika z zacieniania i ewapotranspiracji. Korony drzew liściastych znacząco ograniczają w lecie ilość promieniowania słonecznego, która dociera do podłoża. W zależności od gatunku drzewa zaledwie między 30 a 10% promieniowania zostaje przepuszczone do podłoża, podczas gdy reszta jest zużyta w procesie fotosyntezy lub ulega odbiciu od górnej granicy koron. Zacienienie zatem może skutkować znacząco niższą temperaturą powierzchni pod drzewami, co redukuje dalszą transmisję ciepła (Akbari i in. 1997). Z kolei ewapotranspiracja będąca sumą ewaporacji z gleby i transpiracji roślin także przyczynia się do obniżenia temperatury dzięki temu, że ciepło z powietrza zostaje zużyte w procesie parowania i mniej energii jest dostępne w postaci odczuwalnego ciepła, które jest związane z rzeczywistą temperaturą powietrza (Schwartz i in. 2011). Dzięki temu roślinność może się przyczyniać do regulacji temperatury i wilgotności powietrza w mieście (Degórski i in. 2022). Szczególne znaczenie w ostatnich latach mają nie tylko wyniki pomiarów temperatury potwierdzające zjawisko miejskiej wyspy ciepła (MWC, ang. UHI) na obszarach zurbanizowanych, ale przede wszystkim notowane coraz częściej w lecie i coraz dłużej trwające okresy z ekstremalnie wysokimi temperaturami. W wielu regionach świata notowane są obecnie fale upałów, które występują częściej, trwają dłużej i cechują się większym nasileniem niż w poprzednich dziesięcioleciach (Luo i in. 2024). Nie tylko lasy miejskie, ale wszelkie inne miejskie tereny zieleni mają potencjał regulacji temperatury, ale zależy on od rozmiarów powierzchni zielonej, doboru gabarytów roślin do nasadzeń, a także zastosowanych

gatunków. Odmienne efekty są notowane dla poziomych powierzchniowych nasadzeń (trawników i łąk wielogatunkowych, a także zielonych dachów), zieleni wertykalnej (zielonych ścian oraz pnączy rosnących na trejżach i bezpośrednio na fasadach) oraz drzew.

W pracy Bowler i in. (2010) przeanalizowano ponad 50 publikacji dokumentujących szczegółowe badania w wielu miastach i pokazano, że obecność terenu zielonego w mieście obniża temperaturę powietrza średnio o ok. 1°C w dzień i $1,2^{\circ}\text{C}$ w nocy. Czym większy park, tym większa różnica w temperaturze powietrza między wnętrzem parku i terenem otaczającym. Badania m.in. Taha i in. (1991) oraz Souch i Souch (1993) zwróciły natomiast uwagę na fakt, że w porze nocnej korony drzew utrudniają oddawanie ciepła co przyczynia się do podwyższenia temperatury powietrza w mieście i zwiększenia intensywności MWC. Przekrojowy artykuł z 2021 roku analizujący ponad 300 doniesień naukowych z całego świata potwierdza prawidłowości opisane powyżej, że temperatura powietrza pod drzewami była przeciętnie o $0,8^{\circ}\text{C}$ niższa za dnia, ale obszary zadrzewione charakteryzowała wyższa temperatura powietrza w nocy (gęsto ulistniona korona drzewa powodowała opóźnienie wychładzania opisane w poprzednim rozdziale), zaś efekt chłodzący zależał także od gatunku drzewa. Znaczącym czynnikiem modyfikującym dopływ promieniowania słonecznego w ciągu dnia było zacienienie powierzchni miasta przez korony drzew. W lasach miejskich, czyli wewnątrz dużego zwartej obszaru zadrzewionego, było w ciągu dnia średnio o $1,6^{\circ}\text{C}$ chłodniej niż na obszarach otaczających. Obszary zadrzewione oraz parki i ogrody są zdecydowanie łączone z poprawą komfortu cieplnego człowieka. W omawianym artykule podjęto także zagadnienie zwiększania wilgotności względnej powietrza przez drzewa w mieście i oceniono, że wynosi 1-35% (Knight i in. 2021). Im większe są obszary zielone, tym większa ich skuteczność w oddziaływaniu na temperaturę powietrza wewnątrz kompleksu parkowego / leśnego. Dodatkowo pozytywne oddziaływanie zieleni należy rozpatrywać systemowo w skali miasta i w odniesieniu do jego warunków naturalnych (położenie, rzeźba terenu) i klimatycznych. Efekt obniżania temperatury przez tereny zwartej zieleni o dużej powierzchni, takie jak na przykład liściaste lasy miejskie, może dotyczyć przy sprzyjającym usytuowaniu oraz cyrkulacji powietrza również terenów sąsiednich. Przytoczone wyniki badań wielu autorów wskazują na to, że możemy liczyć na obniżenie temperatury w dzień o ok. 1°C , co należy zestawić z coraz częściej notowanymi temperaturami w lecie przekraczającymi 30°C . Badania dla Pragi w Republice Czeskiej przeprowadzone z wykorzystaniem mikroskalowego modelu klimatu miasta PALM-4U pokazały, że

w czasie fali upałów wpływ zieleni miejskiej na obniżenie temperatury powietrza za zasięg bardzo lokalny, tylko w bezpośrednim sąsiedztwie drzew. Wpływ zielonych ścian i zielonych dachów na własności powietrza w warstwie, gdzie przemieszczają się ludzie jest znikomy i bez praktycznego znaczenia (Geletic i in. 2022). Inną kwestią jest odczuwanie temperatury przez osoby przebywające na zewnątrz i kształtowanie temperatury ciała człowieka przez dopływ promieniowania słonecznego lub przez przebywanie w cieniu, dlatego niniejsze opracowanie koncentruje się na różnych rozwiązaniach zapewniających przede wszystkim zacienienie w mieście.

Jak pokazuje przeglądowy artykuł Arama i in. (2019) coraz więcej prac dotyczących oddziaływania zieleni miejskiej na klimat lokalny odnosi się do analizy zdjęć satelitarnych i informacji o temperaturze radiacyjnej podłoża. W tym kontekście wysnuwane są wnioski o ograniczaniu intensywności MWC przez zielen miejską. W tym miejscu należy podkreślić, że atmosferyczna MWC i powierzchniowa MWC są zupełnie różnymi zjawiskami, o całkowicie innym przebiegu dobowym, innych przyczynach i innych zakresach intensywności. Analiza zdjęć satelitarnych pozwala wnioskować o powierzchniowej MWC, rozwijającej się w dzień, zależnej od dopływu promieniowania słonecznego, która nie ma bezpośredniego przełożenia na temperaturę powietrza w tej jego warstwie, w której funkcjonują mieszkańcy miasta w publicznych przestrzeniach otwartych. Przyczyna rozbieżności tkwi w tym, że satelita rejestruje i uśrednia w danym pikselu m.in. temperaturę np. dachów budynków, jezdni czy górnej granicy koron drzew, czyli powierzchni silnie nagrzanych, a nie wykorzystywanych przez mieszkańców, a ponadto własności fizyczne powietrza (np. mała gęstość, mała pojemność cieplna) są znacząco różne od własności podłoża (duża gęstość, duża pojemność cieplna), co powoduje, że zmiany temperatury przebiegają w obu przypadkach bardzo odmiennie. Jak podkreślono wcześniej, atmosferyczna MWC jest zjawiskiem nocnym i to nie promieniowanie słoneczne, ale różnice w wychładzaniu się obszarów o różnym zagospodarowaniu, pokryciu i użytkowaniu terenu decydują o jej intensywności.

Jak podają Knight i in. (2021) efekt chłodzenia, oceniany na podstawie temperatury radiacyjnej podłoża nie ogranicza się jedynie do samego obszaru parku lub ogrodu, ale może się rozciągać nawet aż do 1,25 km poza ich granice. Powierzchnie trawiaste są chłodniejsze w porównaniu do obszarów niezielonych, zarówno w dzień, jak i w nocy, średnio o 0,6°C. Zielone dachy i ściany wykazują niższą temperaturę powierzchni (średnio odpowiednio 2,0 i 1,8°C), na co ma wpływ zawartość wody w podłożu, gęstość roślinności i pokrycie. Jednak efekt chłodzący zieleni jest zależny od

powierzchni terenu zielonego. Badania wskazują, że największy efekt chłodzenia mają drzewa. Wyniki badań pomiarów temperatury powierzchni wykonanych metodami teledetekcji z wykorzystaniem zdjęć satelitarnych o wysokiej rozdzielczości dla 293 miast europejskich jednoznacznie potwierdzają, że latem i podczas ekstremalnych upałów obszary pokryte drzewami mają niższe temperatury powierzchni niż tereny zwartej tkanki miejskiej. Szczególnie dobrze widoczny jest ten efekt dla badanych miast położonych w Europie środkowej i centralnej, gdzie temperatura na obszarach zadrzewionych była niższa aż o 8 do 11 K. Równocześnie zmierzono, że miejskie tereny zielone pozbawione drzew obniżały temperaturę w znacznie mniejszym stopniu (Schwaab i in. 2021).

Znaczny efekt chłodzenia, zarówno jeśli chodzi o obniżenie temperatury powietrza jak i wskaźnika PET, mają zwłaszcza drzewa liściaste o rozłożystych koronach i wysokim współczynniku ulistnienia (ryc. 12). Eksperymentalne badania prowadzone w Niemczech wskazały, że większy potencjał w tym zakresie mają okazy lipy drobnolistnej (*Tilia cordata Mill.* obniżenie temperatury powietrza pod koroną drzewa o 4°C, obniżenie PET o 11°C) niż robinii akacjowej (*Robinia pseudoacacia L.*, obniżenie temperatury powietrza o 1,9 °C, obniżenie PET o 4°C). Ponadto lipy ze względu na specyficzną budowę drewna wykazują się czterokrotnie większymi możliwościami w zakresie transpiracji (Rahman i in. 2020).

W Krakowie badania dotyczące wpływu zieleni na klimat lokalny były prowadzone w XX w. przede wszystkim przez Lewińską i in. (1982, 1990) oraz Czerwieńca i Lewińską (2000). Po roku 2000 badania takie prowadziła Bokwa (2010) a przeprowadzone pomiary pokazały, że różnice w średniej dobowej temperaturze powietrza między terenami zielonymi i zabudowanymi wynosiły od ok. 0,5°C zimą do ok. 1,3°C latem. Wrona (2022) przeanalizowała pomiary z 16 stanowisk, w tym 13 na terenach zielonych Krakowa: Plantach, w Parku Lotników Polskich, przy Błoniach Krakowskich i w Ogrodzie Botanicznym UJ, z okresu od maja do września 2020 roku. Potwierdziła prawidłowości zaprezentowane powyżej; w punktach reprezentujących powierzchnie antropogeniczne średnio temperatura powietrza była wyższą o 0,6°C względem punktów otoczonych w głównej mierze przez roślinność niską oraz o 0,8°C względem punktów odzwierciedlających warunki termiczne panujące wśród roślinności wysokiej.

EFEKTYWNOŚĆ RÓŻNYCH ROZWIĄZAŃ W OBNIŻANIU PET

	DRZEWA (pojedyncze okazy, grupy, szpalery)	Przekrycia tekstylne	Zielone ściany	Elementy wodne	Powierzchnie „chłodzące” (kształtki ażurowe)
Możliwa redukcja PET	3-19° C	11-21° C	1-4° C	0,5 - 2° C	minimalna
Typ terenu zurbanizowanego	Centrum miasta/ węzeł transportowy/ obszary mieszkalne/ szkoły, miejsca zabaw	Centrum miasta/ węzeł transportowy/ szkoły/ miejsca zabaw	Centrum miasta/ węzeł transportowy/ obszary mieszkalne/ szkoły, miejsca zabaw	Centrum miasta/ węzeł transportowy/ szkoły/ miejsca zabaw	Centrum miasta/ obszary mieszkalne/ szkoły/ miejsca zabaw
Rodzaj nawierzchni	Nawierzchnie utwardzone/ trawniki	Nawierzchnie utwardzone/ trawniki	Nawierzchnie utwardzone	Nawierzchnie utwardzone	Nawierzchnie częściowo utwardzone
Charakterystyka interwencji	- Wysokość, - wielkość - zrzuconego cienia - Średnica korony - Orientacja - Stan - fitosanitarny/mo - żliwość wzrostu - kształt	- Wysokość, - Kształt zrzuconego - cienia - Materiał - przezroczystość	- Wysokość; - Miażdżość; - Orientacja; - Stan fitosanitarny - Powierzchnia - pokrycia ściany	- Obszar wilgotny, - Obszar zamglenia - Przepływ wody lub - jego brak	- Szerokość, - Powierzchnia, - Stan utrzymania

Ryc. 12. Skuteczność różnych rozwiązań z zakresu projektowania zieleni i architektury krajobrazu stosowanych w celu obniżenia współczynnika PET opracowana na podstawie badań i pomiarów zrealizowanych przez zespół z Amsterdam University of Applied Sciences w ramach projektu badawczego Cool Towns w 2023 roku.

Tłumaczenie i przerys: A. Staniewska.

A. Bokwa przeanalizowała dane dotyczące temperatury powietrza z ośmiu punktów pomiarowych w Krakowie i okolicy (należących do sieci pomiarowej Instytutu Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego), z lat 2009-2021 z miesięcy od marca do listopada (badania niepublikowane). Punkty te reprezentowały teren wodny (brzeg rzeki), teren zieleni wysokiej w mieście, teren zieleni niskiej w mieście, rolniczy teren pozamiejski, zabudowę śródmiejską i kanion uliczny oraz zabudowę blokową i willową na terenie miasta. Wszystkie punkty pomiarowe były zlokalizowane w dnie doliny Wisły. Wyniki analiz pokazały, że co prawda średnia roczna i sezonowa intensywność miejskiej wyspy ciepła (czyli różnica temperatury powietrza między punktem w mieście i punktem poza miastem) terenów zielonych i wodnych jest znacząco niższa niż terenów zabudowanych, ale intensywność ta w zieleni wysokiej jest wyższa niż na terenach z zielenią niską. Oznacza to, że zieleń wysoka utrudnia wychładzanie miasta nocą. W przebiegu dobowym, w nocy tereny zielone i wodne w mieście mają wyższą temperaturę powietrza niż tereny pozamiejskie, podobnie jak tereny zabudowane, ale mniejszą o ok. 1,5°C intensywność miejskiej wyspy ciepła niż tereny zabudowane. W dzień na terenach zielonych i wodnych temperatura powietrza jest niższa niż na obszarach pozamiejskich, w przeciwieństwie do obszarów zabudowanych. ALE: część terenów zabudowanych ma intensywność miejskiej wyspy ciepła zbliżoną do terenów zielonych

i wodnych. Zaznacza się odrębność termiczna zabudowy blokowej w zachodniej, wąskiej i wschodniej, szerokiej części doliny Wisły na terenie miasta – tam jest zbliżona do wartości dla terenów miejskiej zieleni wysokiej. Zaznacza się także odrębność termiczna punktu śródmiejskiego przy Plantach, gdzie występują najwyższe (w porównaniu z innymi punktami) wartości intensywności miejskiej wyspy ciepła nocą, zaś w dzień zbliżone są one do terenów zielonych i wodnych. Wyniki te potwierdzają, że roślinność wysoka ma znacznie większy wpływ na kształtowanie temperatury powietrza niż roślinność niska, a także że roślinność wysoka przyczynia się do obniżenia temperatury w dzień, ale opóźnia wychładzanie nocą.

Należy zaznaczyć, że warunki miejskie mogą być środowiskiem bardzo niekorzystnym dla drzew ze względu na nagrzewanie się otoczenia, ograniczony dostęp korzeni do wody i powietrza (ze względu na bariery podziemne, nieprzepuszczalne powierzchnie w najbliższym sąsiedztwie), okresy suszy (Winbourne i in. 2020), zimowe utrzymanie dróg i traktów pieszych przy pomocy soli drogowej. Wszystkie te czynniki mogą wpływać na utrudnienie wzrostu drzew i uniemożliwić im osiągnięcie pełnych rozmiarów oraz wykształcenie się odpowiednio dużej korony rzucającej cień, a także zwiększać podatność na choroby, grzyby i szkodniki. Narażone na stresowe warunki dojrzałe i stare drzewa zamierają szybciej, a młode okazy drzew sadzone w miastach żyją krócej – co w konsekwencji prowadzi do zmniejszenia korzystnych oddziaływań związanych z obniżaniem temperatury. Jak wynika z obserwacji prowadzonych przez instytucje zarządzające zielenią w polskich miastach, niejednokrotnie okres życia nowo sadzonych drzew nie przekracza 5 lat. Wszystko to sprawia również, że sadzenie drzew w miastach nie może być traktowane jako jedyny i uniwersalny środek służący obniżeniu temperatury oraz poprawie klimatu lokalnego (Roman i in. 2020) – skuteczne w tym zakresie może być stosowanie szeregu komplementarnych i skoordynowanych działań w skali zarówno planistycznej jak i projektowej. Zalecenia dotyczące kompleksowego podejścia do mitygacji skutków fal upałów w miastach wydają organizacje branżowe planistów (American Planning Association; Ladd & Meerow, 2022) i architektów krajobrazu (American Society of Landscape Architects; Hirschfeld & Guenther 2024). Jednocześnie konieczne jest zastosowanie adaptacyjnego podejścia do sadzenia i utrzymania już istniejących drzew związanego ze zmianą klimatu (Teixeira i in. 2022). Aby sprostać wyzwaniu jakim jest dobór gatunków roślin do nasadzeń w miastach na całym świecie tworzy się różne narzędzia wspomagające projektantów w tym zadaniu (Tabassum i in. 2023), a nawet katalogi odpowiednich roślin, które są bardziej wytrzymałe i polecane do stosowania w określonych strefach klimatycznych oraz konkretnych przestrzeniach miejskich (na przykład w pasach drogowych, na skwerach

i placach). W Australii naukowcy z Macquarie University i Western Sydney University we współpracy ze szkółkarzami opracowali bazę danych “Which Plant Where” (<https://www.whichplantwhere.com.au>), która ma wspomagać projektantów zieleni w doborze gatunków odpowiednich do warunków miejskich na tym kontynencie w kontekście zmiany klimatu. Ze względu na nasilenie się ekstremalnych zjawisk pogodowych (zwłaszcza występujących coraz częściej fal upałów i okresów suszy) oraz postępującą zmianę klimatu, w wielu miastach konieczna jest aktualizacja list zalecanych gatunków drzew. W Wielkiej Brytanii organizacja pozarządowa łącząca specjalistów i miłośników drzew - The Trees and Design Action Group (TDAG) - opublikowała szczegółowy poradnik wyboru gatunków drzew do kształtowania zielonej infrastruktury zatytułowany “Tree Species Selection for Green Infrastructure: A Guide for Specifiers” (https://www.tdag.org.uk/uploads/4/2/8/0/4280686/tdag_speciesguidev1.3pdf.pdf). Mimo ogólnej tendencji do stosowania gatunków rodzimych, które zazwyczaj lepiej znoszą warunki stresowe, konieczny niekiedy bywa dobór gatunków z cieplejszych stref klimatycznych uważanych dotąd za egzotyczne albo bardziej wytrzymałych na miejski stres i zmianę klimatu odmian drzew rodzimych. W Polsce coraz częściej w warunkach miejskich stosowany bywa platan klonolistny, który w XX wieku był rzadko stosowany z powodu niewielkiej odporności na mrozy, które obecnie nie występują już tak często w okresie zimowym. Przykładowe rozwiązania zawsze muszą być jednak dopasowane do uwarunkowań lokalnych siedliskowych, ale też do tradycji ogrodniczej - własne zestawy gatunków do nasadzeń opracowały Wiedeńskie Ogrody Miejskie (Wiener Stadtgärten) i obejmują one 20 gatunków w większości rodzimych i zdomowionych (odmiany klonów, lip, jesionów, wiązów)¹. Warto nadmienić, że Wiedeń ma własne gospodarstwa ogrodnicze i długą tradycję uprawy roślin ozdobnych (Ogrody kwiatowe Hirschstetten, szkółki i Muzeum Ogródnictwa Kagran) i drzew na potrzeby kształtowania zieleni w mieście. Obecnie drzewa uprawiane są w szkółce Mauerbach, położonej w Lesie Wiedeńskim². Oprócz tego w Wiedniu od 2017 roku jednoroczne rabaty kwiatowe zastępowane są sukcesywnie przez nasadzenia bylin i traw dobranych tak, aby były efektowne wizualnie, niezbyt wymagające w pielęgnacji, odporne na niskie temperatury i nie wymagały zbyt intensywnego podlewania. Na tych nowych miejskich rabatach, koszonych zazwyczaj tylko 1 raz w roku, stosowanych jest 8 zestawów opracowanych

¹ <https://www.wien.gv.at/umwelt/parks/baumsortiment.html> (dostęp: 10.20.2025)

² <https://www.wien.gv.at/umwelt/parks/baumschulen-mauerbach/> (dostęp: 10.20.2025).

dla miasta mieszanek roślin wieloletnich i traw, które mają wysoką wartość ekologiczną, są różnorodne i przyciągają owady oraz ptaki³.

4. Rozwiązania techniczne stosowane w miastach w celu obniżania temperatury powietrza latem

Koncepcja zielonej infrastruktury (ZI) a rozwiązania oparte na naturze (Nature-Based Solutions) – NBS

Aspekty rozważane w projektowaniu systemu ZI, to przede wszystkim kierowanie rozwoju w obszary o niższych wartościach przyrodniczych i kulturowych, jak też wskazywanie terenów, w których należy unikać inwestycji, transformacja i zagospodarowanie terenów zdegradowanych, a także zapewnienie dostępu do terenów rekreacyjnych, zabezpieczenie wartości historycznych i kulturowych, oraz utrzymanie produkcyjnego użytkowania krajobrazu rolniczego. Istotą wdrażania przedsięwzięć o charakterze ZI jest działanie poprzedzające rozwój, ponieważ operowanie w terenach już zainwestowanych często uniemożliwia ukształtowanie funkcjonującego systemu ekologicznego, który jest istotą koncepcji ZI. Skala, w której operować może system zorganizowany zgodnie z teoretycznymi podstawami, obejmuje zarówno inicjatywy na poziomie lokalnym, na które składać się może zespół prywatnych ogrodów, parki miejskie, tereny nadrzeczne (skala miejskiej ZI), jak też ponadlokalnym i regionalnym, zbudowanym w parciu o tereny otwarte na powierzchni sięgającej tysięcy kilometrów kwadratowych (Kowalski, 2014).

Podobną strukturę i formę przestrzenną reprezentują także inne tereny zieleni, które niekoniecznie są integralną częścią większego systemu, niekiedy także ukształtowane wtórnie w wyniku rewitalizacji terenów zdegradowanych. Mogą one także pełnić istotną funkcję w strukturze przestrzennej miasta, należy jednak rozróżnić ich obecność od struktury systemu ZI. Takie lokalne projekty, których celem jest zwiększenie dostępności terenów zieleni dla mieszkańców, poprawa lokalnego klimatu, stworzenie nowych terenów rekreacji, zwiększenie pojemności retencyjnej terenu, etc., ujmowane są pod wspólnym pojęciem rozwiązań opartych na naturze (NBS). W niniejszym opracowaniu poszczególne interwencje projektowe ujęte więc zostaną w ramy NBS, a nie zielonej infrastruktury.

³ <https://www.wien.gv.at/umwelt/parks/anlagen/staudenbeete.html> (dostęp: 10.02.2025)

Ze względu na możliwości obniżania temperatury i zmniejszania stresu cieplnego w pierwszej kolejności należy wymienić rozwiązania zwiększające zacienienie oraz ewapotranspirację. Są to przede wszystkim (za Spanjar i in. 2023):

- A. nasadzenia drzew (pojedynczo, w grupach, rzędach/szpalerach, w formie zagajników, lasów);
- B. zadaszenia / przekrycia (odpowiednik ang. shelter/canopies: żagle, rolety poziome markizy, przekrycia tekstylne);
- C. trejaże i porośnięte pnączami pergole;
- D. zielone ściany (pośrednie, bezpośrednie, żyjące ściany, wolnostojące ekrany zielone);
- E. urządzenia wodne (kanały, ciek wodne, fontanny, kurtyny wodne/rozpylacze mgły);
- F. powierzchnie chłodzące (trawniki/łąki kwietne, „zielone bruki” - perforowana kostka brukowa przerośnięta trawą);
- G. elementy systemu przechwytywania i zarządzania wodami opadowymi (zielone dachy, ogrody deszczowe, bioswales, niecki chłonne, niecki i rowy filtracyjne).

W skali urbanistycznej i architektonicznej należy wspomnieć o zapewnieniu dobrego przewietrzania miasta (zachowanie kanałów przewietrzania wynikających z uwarunkowań usytuowania oraz ukształtowania terenu) oraz optymalnego zacienienia ulic i przestrzeni miejskich przez budynki, a także stosowaniu materiałów o wysokim albedo (stopniu odbicia promieniowania słonecznego) i emisji termicznej (zdolności do odprowadzania zaabsorbowanej energii cieplnej).

Poniżej omówione zostaną krótko poszczególne rozwiązania i ich zalety, które można zastosować w miastach, aby obniżyć temperaturę powietrza i poprawić komfort cieplny użytkowników w gorące dni.

A. Nasadzenia drzew (pojedynczo, w grupach, rzędach/szpalerach, w formie zagajników, lasów)

Nasadzenia drzew mogą być efektywnym rozwiązaniem chłodzącym dzięki ewapotranspiracji oraz rzucaniu przez koronę drzewa cienia (U.S. Environmental Protection Agency. 2008). Skuteczność drzew zależy od wielkości korony, jej kształtu i zagęszczenia ulistnienia – zatem rezultaty będą zależeć do gatunków dobranych do nasadzeń, a także od stanu

zdrowotnego okazów (żywołności) oraz ilości drzew rosnących w jednej lokalizacji. Najwięcej cienia dają duże okazy dojrzałych drzew liściastych rosnące w grupie (ryc. 13).



Ryc. 13. Przykłady zastosowania drzew jako elementów zacieniających.

źródło zdjęć: *pexels.com*

Drzewa jednak potrzebują dla prawidłowego wzrostu miejsca dla korony i bryły korzeniowej, a także wody, powietrza i składników odżywczych zawartych w glebie. Dlatego sadzenie drzew na miejskich placach i w ciągach ulic wymaga zapewnienia odpowiednio dużo miejsca w postaci okienka w nawierzchni (tzw. misy) oraz rozwiązań zapewniających dopływ powietrza do korzeni (zwiększenie przepuszczalności nawierzchni w obszarze korzeni oraz stosowanie systemów napowietrzająco-nawadniających, antykompresyjnych, osłaniających i/lub kierujących korzenie przy drzewach nowoposadzonych). Działania te powinny dać łącznie około 27 m³ objętości gleby dostępnej dla rozwoju korzeni drzew, przy czym efektywna głębokość jakiej naturalnej lub sztucznie zbudowanej struktury powinna zamykać się w przedziale 1–1,5 m. Większość korzeni drzew rozwija się w warstwie podłoża sięgającej około 1 m w głąb profilu glebowego. Obszar znajdujący się bezpośrednio wokół pnia drzewa wymaga również odpowiedniego zabezpieczenia – misa zwykle jest ściółkowana korą albo zrębkami drewnianymi, na placach miejskich często stosowane są w nawierzchni ozdobne kraty umożliwiające dopływ wody i powietrza oraz zapobiegające zniszczeniu mechanicznemu. Możliwe jest też wykonanie nawierzchni wodoprzepuszczalnych z kruszywa zespolonego żywicą. Często wprowadzanie nowych nasadzeń drzew jest niemożliwe albo utrudnione ze względu na infrastrukturę podziemną, która uniemożliwiłaby wzrost bryły korzeniowej. Dlatego

sadzenie drzew w przestrzeni miejskiej może wymagać większych lub mniejszych modyfikacji w prowadzeniu podziemnych instalacji.

B. Zadaszenia / przekrycia (odpowiednik ang. Shelter/canopies: żagle, rolety poziome markizy, przekrycia tekstylne)

Przekrycia tekstylne (żagle i markizy) są technicznym rozwiązaniem wykorzystującym różnego typu tkaniny (zwykle w jasnych kolorach) rozpinane i mocowane do słupów lub elementów konstrukcji architektonicznych, które zapewniają rzucony cień (ryc. 14). Zatrzymują one i odbijają promieniowanie słoneczne, co obniża temperaturę powietrza pod powierzchnią żagla. Jednak ze względu na swoją większą powierzchnię, w niektórych przypadkach, w zależności od materiału, tego rodzaju przekrycia mogą zmniejszać przepływ powietrza i obniżać komfort cieplny pod spodem. Zaletą tego rodzaju zadaszeń jest jednak możliwość ich zwijania na noc, żeby umożliwić chłodzenie terenu w porze niższych temperatur. Rozwiązania tego rodzaju sprawdzają się wszędzie tam, gdzie wprowadzenie roślinności a zwłaszcza drzew jest utrudnione lub niemożliwe.



Ryc. 14. Przykłady żagli i elementów zacieniających z tkanin mocowanych na słupach
źródło zdjęć: *pexels.com*

C. Trejaże i porośnięte pnączami pergole

Konstrukcje porośnięte pnączami zapewniają zarówno zacienienie dzięki liściom jak i zwiększenie ewapotranspiracji (ryc. 15). Trejaże (treliaze) to budowle stosowane od stuleci w ogrodach składające się najczęściej z rzędu słupków spiętych u szczytu belką

konstrukcyjną. Niekiedy przestrzeń między słupami bywa wypełniona mniejszymi elementami (listwami drewnianymi, prętami lub linkami stalowymi). Trejaże służą do podtrzymywania roślin – zazwyczaj pnączy, które oplatając elementy konstrukcji tworzą ażurową zieloną „ścianę”. Materiały, które wykorzystywane są do budowy trejaży to najczęściej drewno, drewno klejone albo stal. Trejaże mogą być elementami wolnostojącymi, ale mogą opierać się także o ściany budynków.



Ryc. 15. Przykłady konstrukcji wspierających wzrost pnączy i trejaży
źródło zdjęć: pexels.com

Pergole z kolei to konstrukcje oparte na dwóch rzędach podpór (murowanych z cegły, kamienia, czy żelbetowych albo stalowych lub drewnianych), które podtrzymują szereg belek lub lekką kratownicę, która stanowi zadaszenie tak powstałej alei (pasażu) (ryc. 16). Zacienienie zapewniają pnącza, które wspinając się po podporach porastają ażurową konstrukcję zadaszenia.



Ryc. 16. Przykłady porośniętych pnączami konstrukcji pergoli
źródło zdjęć: pexels.com

D. Zielone ściany (pośrednie, bezpośrednie, żyjące ściany, wolnostojące ekrany zielone)

Zielone ściany to konstrukcje umożliwiające wprowadzenie zieleni na powierzchniach wertykalnych – albo w postaci rusztu pod pnącza (pręty) albo systemu pozwalającego na zasadzenie i nawadnianie roślin rosnących na panelach z podłożem hydroponicznym lub w modułach zawierających naturalną glebę (ryc. 17). Tego rodzaju instalacje izolują akustycznie, poprawiają jakość powietrza, osłaniają od wiatru oraz schładzają powierzchnię ścian budynków i mogą obniżać temperaturę dzięki ewapotranspiracji (Su i in., 2024). Konstrukcje wolnostojące dodatkowo w ograniczonym zakresie mogą zwiększać zacienienie. Stosowanie zielonych ścian z roślinami uprawianymi w glebie lub na podłożu jest jednak obarczone znacznym ryzykiem ze względu na niskie temperatury w zimie i z tego powodu wymaga stosowania dobrze dobranych roślin oraz niezawodnych systemów nawadniających – inaczej rośliny zamierają i ogród wertykalny traci swoje zalety estetyczne i funkcjonalne. Obecnie istnieje na polskim rynku wiele firm oferujących całokształt systemy żywych ścian, także i takich, które korzystają z bardziej odpornych gatunków rodzimych roślin oraz do nawadniania wykorzystują wodę deszczową.



Ryc. 17. Przykłady zielonych fasad jako elementów lokalnie obniżających temperaturę
źródło zdjęć: pexels.com

E. Urządzenia wodne (kanały, ciekі wodne, fontanny, kurtyny wodne/rozpylacze mgły)

Aby zapewnić chłodzenie w upalne dni w przestrzeni miasta często wykorzystuje się różnego rodzaju urządzenia wodne, które dzięki parowaniu zwiększają wilgotność powietrza

i mogą poprawiać komfort cieplny (ryc. 18). Elementy wodne o większej powierzchni oddziałują głównie dzięki parowaniu, a kurtyny wodne i rozpylacze mgły bywają rozmieszczane tymczasowo w okresach upałów, aby umożliwić bezpośrednie chłodzenie ciała.

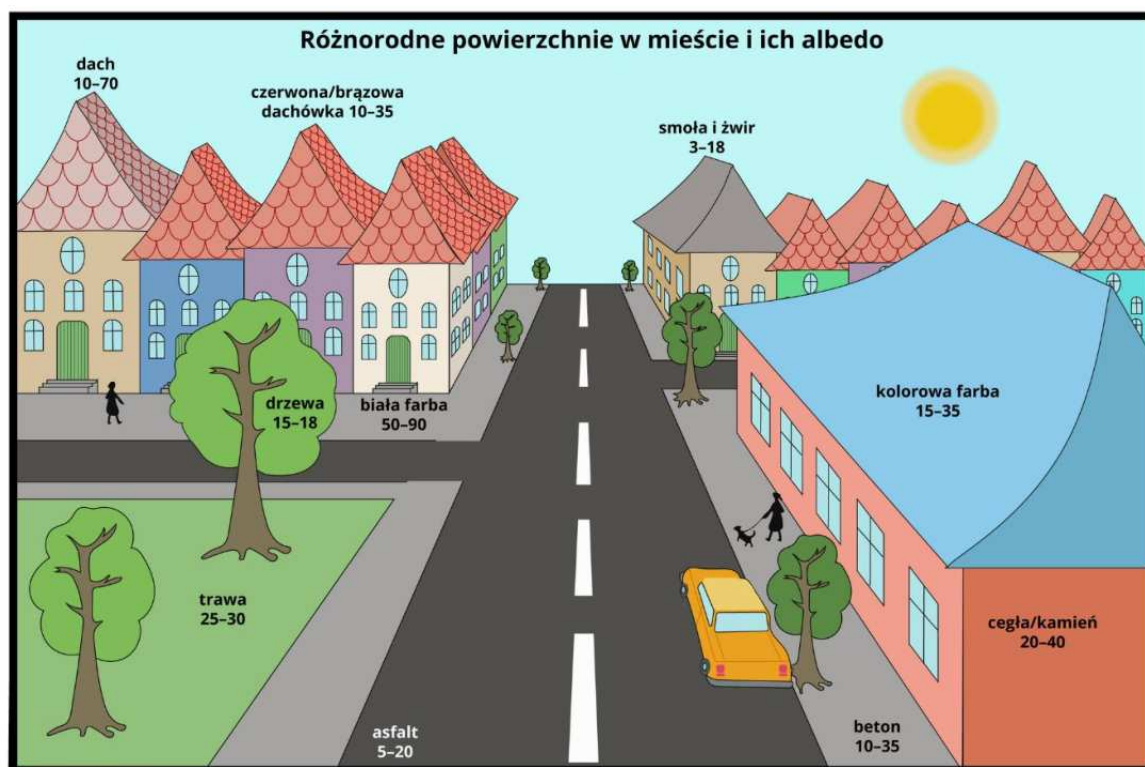


Ryc. 18. Przykłady fontann i elementów wodnych w przestrzeniach miejskich
źródło zdjęć: *pexels.com*

F. Powierzchnie chłodzące (trawniki/łąki kwietne, „zielone bruki” - perforowana kostka brukowa przerośnięta trawą)

Powierzchnie wybrukowane i utwardzone charakterystyczne dla przestrzeni miejskich (na placach miejskich, rynkach, wielkopowierzchniowych parkingach itp.) nagrzewają się, ponieważ zbudowane są z materiałów (beton, asfalt i inne), które odbijają zaledwie od 5 do 40% promieniowania podczerwonego, co oznacza, że absorbują między 95 a 60% energii, która do nich dociera (U.S. Environmental Protection Agency, 2012). Większy współczynnik odbicia (albedo) mają nawierzchnie o jaśniejszych kolorach oraz powierzchnie porośnięte roślinami (ryc. 19a) – dlatego redukcja powierzchni całkowicie wybrukowanych na rzecz niezbyt intensywnie koszonych trawników i wprowadzanie ażurowych kształtek tam, gdzie to możliwe jest jednym z działań na rzecz zmniejszenia nagrzewania się powierzchni poziomych w miastach. Lepsze możliwości chłodzenia i utrzymania wilgotności mają również łąki kwietne i rzadziej koszone trawniki niż intensywnie utrzymywane monokultury trawnikowe (ryc. 19b). Drugim kierunkiem jest stosowanie specjalnych powłok i barwników zwiększających odbijanie promieni słonecznych

z powierzchni brukowanych oraz na pokryciach dachowych. Lepsze właściwości transpiracyjne mają także nawierzchnie przepuszczalne – dlatego bardziej korzystnym materiałem do utwardzania nawierzchni w niektórych strefach miast (zwłaszcza przeznaczonych dla ruchu pieszych może być tzw. beton jamisty oraz nawierzchnie wodoprzepuszczalne stabilizowane np. z kruszyw łączonych żywicami, które mogą występować w różnych zabarwieniach, co wiąże się z niższym nagrzewaniem).



Ryc. 19a. Różnorodne powierzchnie w mieście i ich albedo

Źródło: <https://zpe.gov.pl/a/przeczytaj/DQanmSNhu>

Na podstawie danych: prof. dr hab. K. Błażejczyk IGiPZ PAN *Warunki powstawania i zróżnicowanie miejskiej wyspy ciepła w Warszawie*, [online], dostępny w internecie:

https://www.igipz.pan.pl/tl_files/igipz/ZGiK/projekty/UHI/Warunki.pdf

Eduexpert Sp. z o.o., CC BY-SA 3.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.



Ryc. 19b. Przykłady poziomych przestrzeni chłodzących w przestrzeniach miejskich
źródło zdjęć: pexels.com

G. Elementy systemu przechwytywania i zarządzania wodami opadowymi (zielone dachy, ogrody deszczowe, bioswales, niecki chłonne, niecki i rowy filtracyjne)

Zielone dachy mogą redukować nagrzewanie się powierzchni dachów płaskich, zapobiegać stratom ciepła w budynkach oraz sprzyjać retencjonowaniu wód opadowych (Jamei i in., 2023). Zalety zielonych dachów wiążą się również z absorpcją zanieczyszczeń i długim cyklem życia tego rodzaju instalacji (U.S. Environmental Protection Agency, 2008), który jest istotny mimo wysokich kosztów na etapie budowy (Dynakowska i in. 2023).

Aby możliwe było w przestrzeniach miejskich utrzymanie obszarów wegetacji, które będą poprawiać obniżać stres cieplny w okresach upałów konieczne jest zapewnienie roślinom wystarczającego nawadniania. W obliczu zwiększającej się liczby dni z wysokimi i ekstremalnie wysokimi temperaturami oraz okresami suszy coraz koniecznością powinno być racjonalne gospodarowanie wodami opadowymi, które wyklucza ich odprowadzanie do kanalizacji i koncentruje się na ich gromadzeniu w celu powtórnego wykorzystania. Zatem wszędzie, gdzie to tylko możliwe uzasadnione jest budowanie zbiorników retencyjnych oraz wprowadzanie rozwiązań opartych na przyrodzie, które spowalniają spływ powierzchniowy, oraz zatrzymują, filtrują i oczyszczają deszczówkę. Do polecanych rozwiązań należą różne typy ogrodów deszczowych, stawy i niecki chłonne, retencyjne i filtracyjne, rowy bioretencyjne i inne metody (Bergier i Kowalewska, 2019, Adamowski i in. 2017) wykorzystujące nasadzenia roślin do zatrzymania a następnie zwiększenia wykorzystania wód opadowych do utrzymania terenów zieleni.

CZĘŚĆ II

5. Charakterystyka wybranych lokalizacji na terenie Krakowa

Do dalszej analizy wybrano po trzy przykłady dużych parkingów otwartych (IKEA, CH Serenada, CH Zakopianka), placów miejskich (Rynek Podgórski, Plac Jana Nowaka Jeziorańskiego, Nowy Kleparz), osiedli bloków (Podwawelskie, Szkolne, Europejskie) i ciągów komunikacyjnych (ul. Wielicka, ul. Lema, al. Solidarności). Niniejszy rozdział prezentuje kryteria wyboru tych lokalizacji oraz cechy ich środowiska, zarówno naturalne, jak antropogeniczne, istotne z punktu widzenia zasadności planowanych inwestycji oraz możliwości ich realizacji.

5.1. Kryteria wyboru lokalizacji: dużych parkingów otwartych, placów miejskich, osiedli bloków i ciągów komunikacyjnych

Na potrzeby niniejszego opracowania postanowiono wybrać lokalizacje, w których pożądanym byłoby wprowadzenie rozwiązań poprawiających komfort cieplny użytkowników w upalne letnie dni przez realizację elementów NBS w skali lokalnej. Może tam występować potencjalny wysoki poziom stresu cieplnego, a pod uwagę wzięto następujące czynniki:

- znaczny obszar powierzchni nieprzepuszczalnych;
- niedostateczną ilość zieleni zacieniającej;
- częste użytkowanie przez mieszkańców;
- występowanie ruchu pieszego i/lub rowerowego i jednocześnie brak cienia;
- obszary zabudowy wielorodzinnej blokowej jako obszary codziennego zamieszkania.

Jako pierwsze wybrano duże powierzchniowo obszary w znacznym stopniu pokryte nawierzchniami utwardzonymi i nieprzepuszczalnymi oraz najczęściej całkowicie odkryte, pozbawione cienia, ze znacznym udziałem ruchu kołowego. Zewnętrzne parkingi sklepów wielkopowierzchniowych stanowią rozległe powierzchnie, które bardzo się nagrzewają. Jednocześnie są to zazwyczaj miejsca pozbawione uwarunkowań historycznych, w których wprowadzenie zieleni oraz innych rozwiązań można byłoby potraktować modelowo i próbować podjąć efektywne działania wykorzystujące społeczną i środowiskową odpowiedzialność biznesu w celu budowy partnerstwa publiczno-prywatnego na rzecz poprawy komfortu cieplnego.

Z kolei place miejskie, to obszary tradycyjnie uczęszczane przez mieszkańców, o charakterze reprezentacyjnym lub handlowym, o znacznym udziale powierzchni nieprzepuszczalnych i zazwyczaj otoczone zabudową pierzejową, z obecnym, ale ograniczonym ruchem kołowym. Niedostatek wysokiej zieleni (zwłaszcza okazałych drzew) bywa podyktowany uwarunkowaniami historycznymi, ale także jest skutkiem niekorzystnych warunków siedliskowych.

Osiedla bloków mieszkalnych to obszary o dużej gęstości zamieszkania stanowiące miejsce codziennego funkcjonowania dla znacznej liczby mieszkańców, których komfort życia zależny jest od jakości najbliższego otoczenia i otaczających bloki wspólnych przestrzeni zielonych i publicznych. Zdecydowano się włączyć te obszary do opracowania w celu pokazania możliwości poprawy bioklimatu miasta w obszarach mieszkaniowych.

Wybrane ulice to istotne ciągi komunikacyjne, o różnym natężeniu ruchu pieszego i rowerowego, łączące ważne obszary w mieście, ale trudne w użytkowaniu w warunkach wysokiej temperatury i dużego nasłonecznienia ze względu na brak cienia i skąpą zielen przyuliczną.

Celowość rozwiązań opartych na naturze (NBS) w wybranych lokalizacjach

Biorąc pod uwagę uwarunkowania przestrzenne, które mają wpływ na klimat lokalny wybranych lokalizacji, określone zostały następujące cele, osiągnięcie których powinno mieć korzystny wpływ na poprawę lokalnego klimatu:

- obniżenie wskaźnika ekwiwalentnej temperatury fizjologicznej (PET) i mierzonego stresu termicznego w okresie letnim,
- wzrost wielkości zróżnicowanego wskaźnika wegetacji NDVI,
- ukształtowanie urozmaiconej mozaiki typów pokrycia terenu w celu poprawy lokalnego przepływu powietrza dzięki zwiększeniu różnicy temperatur, a tym samym różnic ciśnienia.

Realizacja celów możliwa będzie poprzez:

- zwiększenie zacienienia powierzchni, co prowadzi do obniżenia temperatury podłoża oraz

- zwiększenie poziomu ewapotranspiracji, prowadzącego do obniżenia temperatury i wzrostu wilgotności powietrza.

Zestaw narzędzi wykorzystanych do kształtowania NBS dla osiągnięcia założonych celów

Dla osiągnięcia założonych celów konieczne jest zastosowanie komplementarnych i skoordynowanych działań w skali projektowej. Polegają one na zastosowaniu w każdym przypadku wielu rozwiązań o różnym charakterze, które łącznie prowadzą do poprawy określonych wskaźników PET i NDVI.

W ujęciu szczegółowym, spośród opisanych uprzednio możliwych rozwiązań z zakresu NBS, w projektach dla wybranych obszarów wykorzystano następujące rozwiązania:

- Tworzenie wielowarstwowego układu zieleni, w tym:
 - wykorzystanie gatunków drzew o rozłożystych i wysokich koronach,
 - wykorzystanie pnączy na trejżach,
 - zastosowanie krzewów okrywowych,
 - zastosowanie roślin zielnych typowych dla różnego rodzaju siedlisk: wilgotnych i suchych.

Wielowarstwowy, zróżnicowany układ zieleni charakteryzuje się bardziej znaczącym oddziaływaniem na obniżenie temperatury otoczenia niż struktury o jednorodnym charakterze.

- Retencja i ponowne wykorzystanie wód opadowych, w tym:
 - budowa ogrodów deszczowych,
 - budowa sztucznych mokradeł,
 - wykonanie zielonych dachów ekstensywnych,
 - instalacja podziemnych szczelnych zbiorników na deszczówkę o dużej pojemności, z zapewnieniem awaryjnego przelewu do kanalizacji deszczowej,
 - budowa automatycznych systemów nawadniających z wykorzystaniem zraszaczy wynurzalnych i linii kroplujących.

Parowanie wody z powierzchni otwartych zbiorników wodnych przyczynia się do obniżenia temperatury wody, podnosi także atrakcyjność terenu. W tym celu przewiduje się w wybranych lokalizacjach budowę sztucznych mokradeł z dużymi obszarami stawów, a w większości terenów także ogrodów deszczowych. Wykorzystanie wody deszczowej do

nawadniania projektowanych terenów zielonych, z jednej strony przyczynia się do poprawy warunków rozwoju roślin (drzew, krzewów i roślin zielnych), jednocześnie wpływa na zwiększenie poziomu ewapotranspiracji. Realizacja zielonych dachów ekstensywnych sprzyja ograniczeniu spływu powierzchniowego, przyczynia się także do obniżenia temperatury powietrza, co ma szczególne znaczenie w przypadku dużych powierzchni dachów centrów handlowych.

- Łączenie wykorzystania oddziaływania zwartych powierzchni pokrytych wielowarstwową, zróżnicowaną roślinnością z otwartymi powierzchniami wody, w tym wodą w ruchu.

Uzyskanie efektu synergii poprzez jednoczesne zastosowanie wielu rozwiązań przyczynia się do wzrostu wydajności zastosowanych rozwiązań.

- Tworzenie możliwie rozległych powierzchni pokrytych zielenią.

Takie podejście zapewnia lepsze warunki rozwoju dla roślin, jednocześnie zwiększa intensywność oddziaływania na otoczenie w zakresie obniżenia temperatury.

Główne założenia w wykorzystaniu narzędzi i projektowaniu szczegółowych NBS

Układ zieleni

Największe znaczenie dla obniżenia temperatury podłoża oraz wskaźnika PET mają drzewa o rozłożystych koronach. Z tego względu w wielu lokalizacjach wprowadzone zostaną gatunki rozwijające korony o znacznych rozmiarach, w uzasadnionych przypadkach także w drodze znacznej ingerencji w układ komunikacyjny na danym terenie, również z uwzględnieniem ograniczenia liczby miejsc parkingowych. Na terenie otwartych parkingów wykorzystane zostaną pnącza, dla których wybudowane zostaną rozbudowane pergole. Ich układ przestrzenny umożliwi powiększenie obszaru zacienienia, bez znaczącego ograniczenia liczby miejsc parkingowych. Przestrzenie pomiędzy podporami pergoli zagospodarowane zostaną krzewami okrywowymi. W terenach otwartych zaprojektowane zostaną łąki kwietne, z wykorzystaniem gatunków odpowiednich do wykształconego siedliska.

Retencja i wykorzystanie wód opadowych

Retencja wód opadowych realizowana jest jednocześnie na kilku płaszczyznach, jednak zasadniczym celem jest ograniczenie odprowadzenia wód opadowych do kanalizacji i jej ponowne zagospodarowanie na miejscu. W każdym przypadku zapewniony jest jednak awaryjny przelew do kanalizacji opadowej. Ze względu na konieczność zagospodarowania wód opadowych z nawierzchni ciągów komunikacyjnych, są one w każdym przypadku wprowadzane do systemu wstępnego podczyszczania z osadnikiem i separatorem olejów. Następnie poprzez system rurociągów doprowadzane są do ogrodów deszczowych, gdzie następuje infiltracja w głąb profilu glebowego lub dalsze podczyszczenie i odprowadzenie do kanalizacji deszczowej. Szczegółowe rozwiązania ogrodów deszczowych w zakresie użytych technologii (ogród infiltracyjny lub filtracyjny) nie zostało uwzględnione w niniejszym opracowaniu, ze względu na jego ogólny charakter. W wybranych sytuacjach przewidziano wykonanie sztucznych mokradeł, do których funkcjonowanie oparte jest w głównej mierze na grawitacyjnym przepływie wody przez poszczególne strefy.

W systemie retencji wody istotną rolę odgrywają zbiorniki na wodę opadową. W obliczeniu niezbędnej objętości retencyjnej przyjęto uśrednioną wielkość sumy rocznych opadów w Krakowie, która wynosi 650 mm. Obliczenie objętości retencyjnej oparte zostało na założeniu, że istotne jest zatrzymanie większości uśrednionego opadu przypadającego na okres spoczynku roślin, nie zaś zgodnie ze standardową kalkulacją dla deszczu nawalnego. Objętość zbiorników dla każdej lokalizacji stanowi iloczyn odwadnianej powierzchni w m^2 (z uwzględnieniem rozwiązań projektowych) i wielkości opadu w okresie od połowy października do połowy kwietnia, która wynosi 214 mm. Takie założenie zostało przyjęte ze względu na narastające zjawisko suszy glebowej i hydrologicznej, związane ze zmniejszającą się liczbą dni z pokrywą śnieżną, a w konsekwencji deficytem wody występującym w krytycznym dla rozwoju roślin okresie szczególnie szybkiego rozwoju wiosną. Woda zatrzymana w zbiornikach retencyjnych będzie mogła zostać wykorzystana do nawodnienia terenów zieleni od wczesnej wiosny, będzie także tłoczona do ogrodów deszczowych. Nawadnianie terenów zieleni realizowane będzie z wykorzystaniem podziemnych rurociągów, zraszaczy wynurzalnych i linii kroplujących. System zasilany będzie ze zbiornika retencyjnego z wykorzystaniem wysokowydajnych pomp.

Projektowane są zielone dachy ekstensywne wprowadzane na istniejące lub projektowane dachy budynków i lekkich zadaszeń. Przewidziano wykorzystanie systemu

ekstensywnego ze względu na niewielką masę (ok. 100 kg/m²) oraz wystarczającą pojemność retencyjną (ok. 30 l/m²). Takie rozwiązanie umożliwia wprowadzenie do istniejących budynków (po uprzedniej analizie szczegółowych rozwiązań konstrukcyjnych obiektu), a także stosowanie ekonomicznych projektów konstrukcji zadaszonych w przestrzeniach publicznych.

Łączenie różnych typów rozwiązań

Przed przystąpieniem do opracowania koncepcji wykonana została analiza poszczególnych lokalizacji. Na tej podstawie dobrane zostały rozwiązania, które w określonych układach przestrzennych przyniosą najbardziej korzystne rezultaty. Wybór określonych technologii dokonywany był indywidualnie, jednak uzyskany schemat działania stanowi pewien uniwersalny standard, który może zostać wykorzystany także w innych lokalizacjach na terenie miasta.

Tworzenie rozległych terenów pokrytych zielenią

Jak wykazano w opisie stanu badań, istnieje pozytywna korelacja pomiędzy wielkością terenu zieleni, a jego efektem chłodzącym. Z tego względu, podczas opracowania rozwiązań koncepcyjnych nie unikano także znaczącego przekształcania istniejącego zagospodarowania terenu. Jedynie w przypadku projektu zagospodarowania terenu wzdłuż ciągów komunikacyjnych oraz na obszarze osiedli mieszkaniowych, interwencja projektowa ograniczona została do wykorzystania istniejących terenów zieleni, ewentualnie ich niewielkiego uzupełnienia. W rezultacie na terenach placów miejskich oraz parkingów wielkopowierzchniowych uzyskano znaczący wzrost powierzchni biologicznie czynnej względem stanu istniejącego. W osiedlach i w otoczeniu ciągów komunikacyjnych dążono do zwiększenia powierzchni cieniowanej poprzez zwiększenie użycia gatunków drzew o rozłożystych koronach oraz wprowadzenia obszarów retencji wody (ogrody deszczowe i sztuczne mokradła) w istniejące tereny zieleni. Dzięki temu, wraz z wprowadzeniem automatycznego nawadniania, notuje się zwiększenie poziomu ewapotranspiracji zbliżonego do wielkości typowej dla terenów zieleni naturalnej i wód otwartych na terenie Krakowa, który wynosi 512 mm w ciągu całego okresu wegetacyjnego.

Zwiększenie wielkości powierzchni zacienionych, nawet w przypadku braku redukcji nawierzchni nieprzepuszczalnych

Zmniejszenie udziału powierzchni utwardzonych, które silnie się nagrzewają i akumulują ciepło sprzyja obniżeniu wskaźnika PET. Cieniowanie powierzchni w projektach zostało uzyskane poprzez:

- wprowadzenie gatunków o możliwie rozłożystych koronach, z uwzględnieniem dostępnej przestrzeni lub
- zastosowanie pnączy na wielkoskalowych pergolach. Wykorzystanie tego rozwiązania na obszarach wielkopowierzchniowych parkingów w rejonie centrów handlowych może przynieść efekt w postaci osiągnięcia powierzchni ocienionych na poziomie ponad 50% całego obszaru. Pnącza, w odróżnieniu od drzew, charakteryzują się szczególnie szybkim wzrostem (nawet do 5 m rocznie), zatem osiągnięcie oczekiwanej wielkości powierzchni cieniowanych możliwe jest w najkrótszym terminie.

5.2. Cechy środowiska przyrodniczego wybranych lokalizacji istotne dla kształtowania klimatu lokalnego

Wybrane lokalizacje są przykładami obszarów charakterystycznych w obszarze miasta, które mają znaczny potencjał do implementacji rozwiązań zielonej infrastruktury. Łącznie wybrano dwanaście obszarów, po trzy przykłady terenów miejskich takich jak: parkingi przy centrach handlowych, place miejskie, osiedla bloków mieszkalnych oraz ciągi komunikacyjne. Każdy z wybranych obszarów posiada zestaw cech wspólnych z pozostałymi obszarami, dzięki którym można przyrównać go do innych części miasta. W poprzednich rozdziałach dowiedziono jak ważnymi czynnikami kształtującymi klimat miasta jest ukształtowanie terenu i roślinność. Równie ważnym czynnikiem jest wpływ struktur antropogenicznych, w tym budynków. Obszary takie cechują się niewielką lub nawet brakiem przepuszczalności wód opadowych, zdecydowanie mniejszym albedo niż obszary pokryte zielenią (czyli odbijają mniej promieniowania słonecznego niż tereny zielone a pochłaniają więcej tego promieniowania niż tereny zielone co przekłada się na większe wypromieniowanie ciepła i wyższą temperaturę powietrza), a wysokość budynków różnicuje

szorstkość aerodynamiczną terenu i może wpływać na warunki anemometryczne, czyli powodować lokalne obniżenie lub wzrost prędkości wiatru i zmianę jego kierunku. W związku z tym wykonano analizę takich parametrów jak: wartość znormalizowanego różnicowego wskaźnika wegetacji (NDVI), wysokość obiektów i roślinności oraz wysokość zabudowy dla wszystkich dwunastu punktów.

W tabeli 3 przedstawiono wartości wskaźnika NDVI oraz średnią wysokość łącznie wszystkich obiektów naziemnych, a także oddzielnie średnią wysokość roślinności i zabudowy w obrębie każdego z obszarów i w promieniu 300 m od jego granic. Uwzględnienie takiego 300-metrowego buforu jest podyktowane metodyką badań klimatu w skali lokalnej; własności fizyczne powietrza w danym punkcie na standardowej wysokości 2 m nad poziomem gruntu są kształtowane wskutek oddziaływania obszaru w promieniu ok. 300 m wokół tego punktu.

Tab. 3. Charakterystyka wybranych obszarów opracowania

Nr	Nazwa	Rodzaj	NDVI [-1;1]	Wys. Obiektów [m]	Wys. Roślinności [m]	Wys. Zabudowy [m]
1	IKEA	parking	0,180	3,15	1,89	8,58
2	CH Serenada	parking	0,178	4,85	3,77	14,23
3	CH Zakopianka	parking	0,197	4,04	4,91	9,22
4	Rynek Podgórski	plac miejski	0,181	7,03	9,66	11,87
5	Plac J. Nowaka Jeziorańskiego	plac miejski	0,158	8,12	8,50	14,50
6	Nowy Kleparz	plac miejski	0,200	7,77	7,49	12,96
7	Os. Szkolne	osiedle bloków	0,323	7,48	8,09	12,60
8	Os. Podwawelskie	osiedle bloków	0,301	5,85	5,75	12,14
9	Os. Europejskie	osiedle bloków	0,242	4,22	3,46	14,57
10	ul. S. Lema	ciąg komunikacyjny	0,322	4,59	4,07	13,94
11	ul. Wielicka	ciąg komunikacyjny	0,321	6,00	6,80	11,90
12	Aleja Solidarności	ciąg komunikacyjny	0,297	7,34	7,46	15,72

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych GUGiK i ESA.

Jak wspomniano w rozdz. 2, wskaźnik NDVI przyjmuje wartość od –1 do 1. Wartości ujemne i bliskie zera są charakterystyczne dla obszarów wodnych, pokrytych śniegiem itp.

Im wyższe wartości dodatnie tym gęstsza, zdrowsza i bujniejsza roślinność porasta badany obszar oraz tym aktywniej zachodzi na badanym obszarze fotosynteza. Dane w tabeli 3 pokazują, że w wybranych do analizy lokalizacjach wskaźnik NDVI przyjmuje wartości od 0,158 (Plac J. Nowaka-Jeziorańskiego) do 0,324 (os. Podwawelskie) co oznacza niewielki udział roślinności w pokryciu terenu, ale zarazem relatywnie duże zróżnicowanie wybranych lokalizacji pod względem użytkowania terenu. Lokalizacje, gdzie NDVI przekracza 0,3 (os. Szkolne, os. Podwawelskie, ul. Lema i ul. Wielicka) mają ten wskaźnik niemal dwukrotnie wyższy niż wszystkie parkingi, Rynek Podgórski i Plac J. Nowaka-Jeziorańskiego. Warto zwrócić uwagę na różnicę wartości NDVI między starymi osiedlami bloków, wybudowanymi przed 1990 r. (os. Szkolne i os. Podwawelskie – ok. 0,32) i nowym osiedlem Europejskim: 0,24. Różnica ta pokazuje, że w starych osiedlach zachowano większe odstępy między budynkami niż w nowych i tereny te wykorzystano w znacznej mierze na urządzenie zieleni.

Aby lepiej przybliżyć zróżnicowanie wskaźnika NDVI w obrębie wybranych obszarów i w promieniu 300 m wokoło nich wykresy pudełkowe dla tego wskaźnika opracowano (ryc. 20). Każdy prostokąt pokazuje wartości NDVI dla połowy pikseli znajdujących się w badanym obszarze, koniec kreski powyżej prostokąta pokazuje najwyższą wartość NDVI w danym obszarze, a koniec kreski poniżej prostokąta - wartość najniższą. Krzyżyk w środku prostokąta pokazuje wartość średnią (która jest dokładnie podana w tabeli 3) a pozioma kreska w środku prostokąta to mediana, czyli wartość środkowa przy uporządkowaniu wartości NDVI dla danej lokalizacji ze wszystkich pikseli od najmniejszej do największej. Dla parkingów, placów i os. Europejskiego wartość mediany jest znacząco niższa od wartości średniej co oznacza, że pikseli z wartościami większymi od średniej jest relatywnie mało, a wartość średnią kształtują głównie piksele o niskich wartościach NDVI. Dla pozostałych lokalizacji średnia i mediana mają zbliżone wartości co wskazuje, że pikseli o wartościach NDVI powyżej średniej jest mniej więcej tyle samo co pikseli o wartościach NDVI poniżej średniej. Parkingi i place miejskiej są to stosunkowo duże obszary silnie przekształcone antropogenicznie. Co więcej, wiele placów miejskich leży w obrębie lub sąsiedztwie zabudowy staromiejskiej, cechującej się zwartą zabudową i wąskimi ulicami, gdzie implementacja obszarów zielonych dostępnych z poziomu przechodniów jest utrudniona.

Tabela 3 pokazuje także wysokość budynków i zieleni. Czym wyższe budynki tym większa ich powierzchnia całkowita (czyli powierzchnia ścian i dachu), a tym samym jest

więcej powierzchni, która może pochłaniać promieniowanie słoneczne i potem je oddawać do atmosfery w postaci ciepła. Ale wyższy budynek to także więcej cienia jaki ten budynek daje co z kolei obniża temperaturę powietrza w jego bezpośrednim sąsiedztwie. Potencjalne oddziaływanie zieleni na warunki termiczno-wilgotnościowe otoczenia zależy od rodzaju tej zieleni. Zieleń niska jak np. trawniki nie ma większego znaczenia dla modyfikacji temperatury powietrza, natomiast zieleń wysoka to zazwyczaj drzewa, które dają cień i w ten sposób przyczyniają się, podobnie jak budynki wspomniane wyżej, do obniżania ilości promieniowania słonecznego docierającego do podłoża. Średnia wysokość roślinności dla danego obszaru jest tylko wartością orientacyjną; dużo ważniejsze jest jak roślinność o danej wysokości jest rozmieszczona, czy tworzy zwarte kompleksy czy też występuje pojedynczo. Dlatego poniżej zaprezentowano dla poszczególnych lokalizacji szczegółowe ryciny pokazujące rozkład przestrzenny parametrów uwzględnionych w tabeli 3.

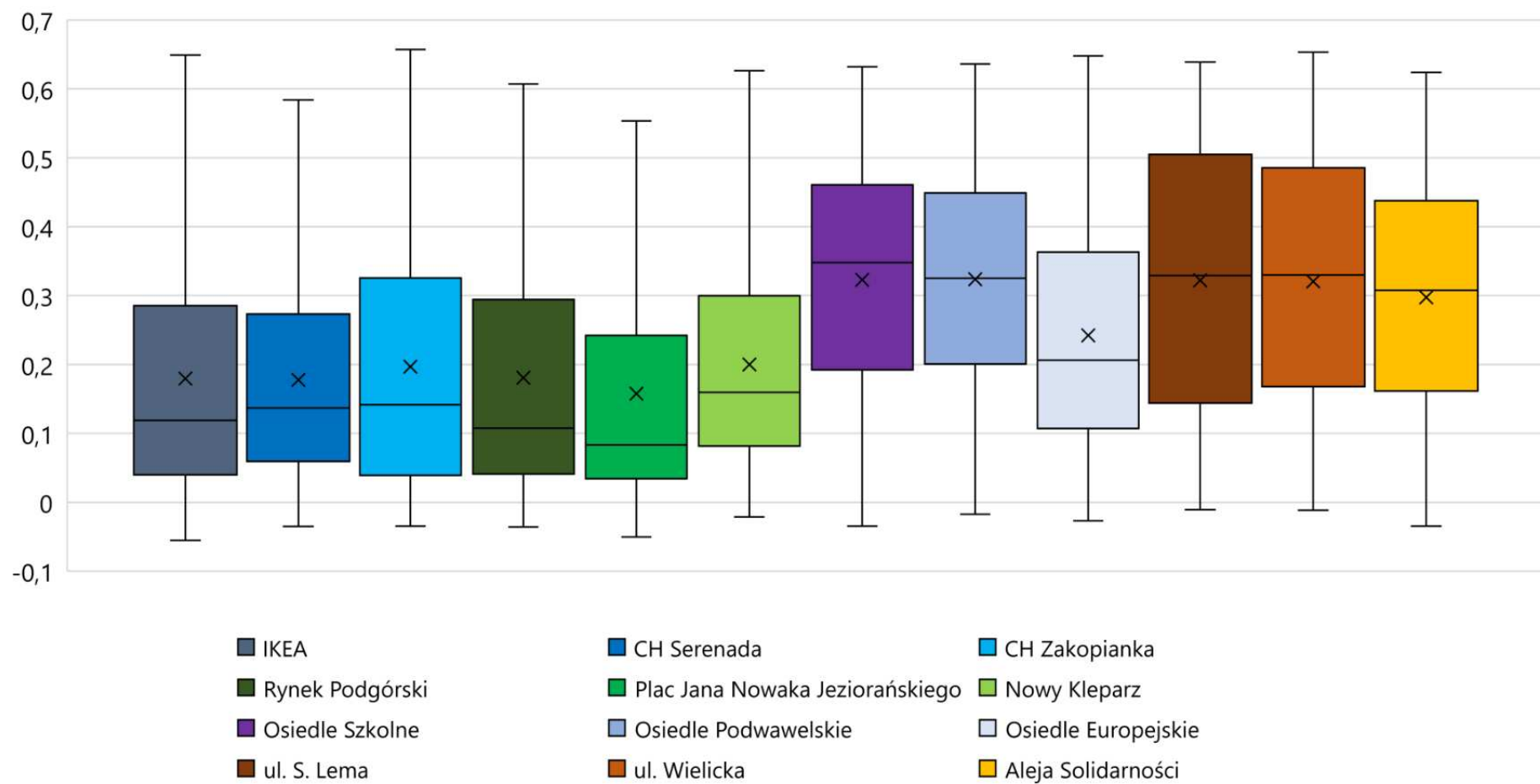
Tabela 4 pokazuje procentowy udział każdego z przedziałów wartości współczynnika NDVI w każdym z wybranych obszarów. Zauważyć można, że średnia wartość NDVI pokazana w poprzedniej tabeli (tab. 3) nie została zafałszowana przez wartości odstające – również w tabeli 4 możemy zauważyć, że obszary parkingów przy centrach handlowych, placów miejskich oraz Osiedla Europejskiego cechują się znacząco większym udziałem obszarów antropogenicznych (wartości współczynnika NDVI z zakresu: 0-0,2) oraz znacząco mniejszym udziałem obszarów o aktywnej, niezakłóconej fotosyntezie (wartości współczynnika NDVI powyżej 0,4).

Tab. 4. Procentowy udział wartości współczynnika NDVI z podziałem na wybrane obszary opracowania.

Nr	Nazwa	Wartość NDVI				
		≤ 0	(0;0,2)	(0,2;0,4)	(0,4;0,6)	$> 0,6$
1	IKEA	2,3	62,4	20,2	13,8	1,3
2	CH Serenada	1,6	61,8	26,1	10,5	0,0
3	CH Zakopianka	1,1	57,5	23,0	17,7	0,7
4	Rynek Podgórski	7,6	58,3	16,1	18,0	0,0
5	Plac J. N. J.	0,9	70,0	15,4	13,7	0,0
6	Nowy Kleparz	0,1	59,4	27,7	12,7	0,1
7	Os. Szkolne	3,9	22,3	34,1	39,4	0,3
8	Os. Podwawelskie	0,0	24,8	39,4	35,3	0,4
9	Os. Europejskie	0,3	48,7	29,6	20,6	0,8
10	Al. Solidarności	2,6	29,3	35,0	33,0	0,1
11	ul. S. Lema	0,3	33,8	23,6	40,7	1,6
12	ul. Wielicka	0,1	30,8	28,9	39,2	1,0

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych ESA.

Oprócz tego przedstawiono fragmenty ortofotomapy z 2022 r. w dwóch skalach barwnych: RGB i CIR. Pierwsza z nich przedstawia kolorystykę barw naturalnych, czyli taką, jaka jest widziana ludzkim okiem. Druga natomiast to tzw. „barwy fałszywe”. Dzięki przestawieniu kanałów spektralnych lepiej uwidocznione jest położenie zieleni (kolor różowy – im bujniejsza i zdrowsza zieleń, tym ciemniejszą, bardziej zbliżoną do czerwieni, przybiera obszar). Obszary przekształcone przez człowieka cechują się barwą jasnoniebieską lub żółtą (w zależności od koloru takiego obszaru), natomiast goła gleba, skały itp. przyjmują różne odcienie szarości, w zależności od barwy podłoża.



Ryc. 20. Wykres pudełkowy wartości wskaźnika NDVI dla poszczególnych obszarów

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych ESA.

Parking przy IKEA

Ukształtowanie terenu i wysokość bezwzględna: Średnia bezwzględna wysokość na tym obszarze wynosi 229,51 m n.p.m. Leży on powyżej doliny Wisły, w granicach makroregionu Brama Krakowska, w bliskim sąsiedztwie Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej (Solon i in. 2018).

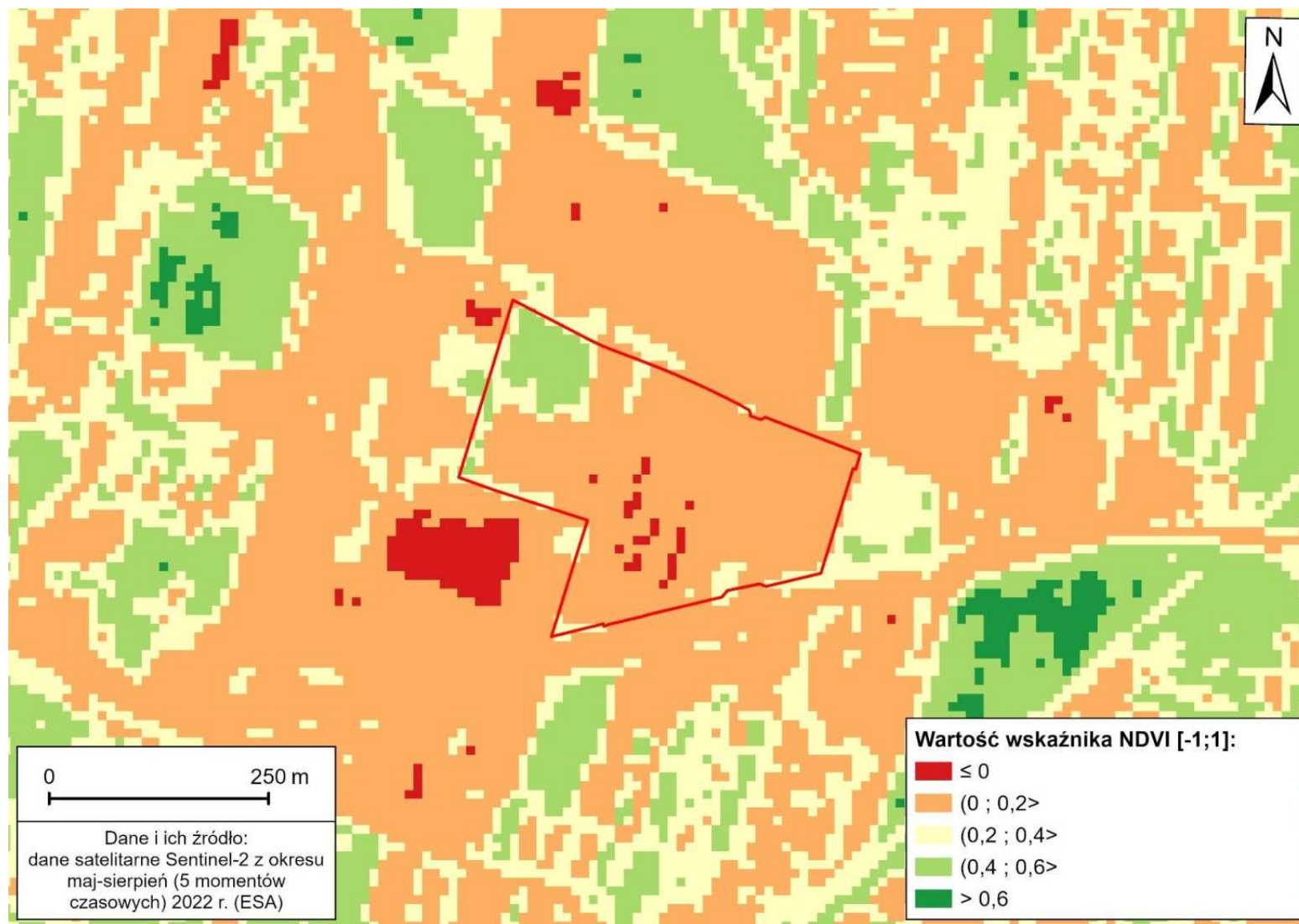
Wskaźnik NDVI i struktura pokrycia terenu: W większości są to obszary antropogeniczne (wartość 0-0,2), niewielkie obszary zieleni pomiędzy obszarami antropogenicznymi (0,2-0,4 i 0,4-0,6). Średnia wartość współczynnika NDVI wynosi 0,180.

Roślinność: Niewielkie obszary zieleni pomiędzy obszarami antropogenicznymi (jezdnie, chodniki, zabudowania), głównie zieleń niska (0-1,0 m), z niewielkim udziałem zieleni o wysokościach ze wszystkich zakresów (od 1,0 m do nawet ponad 20 m).

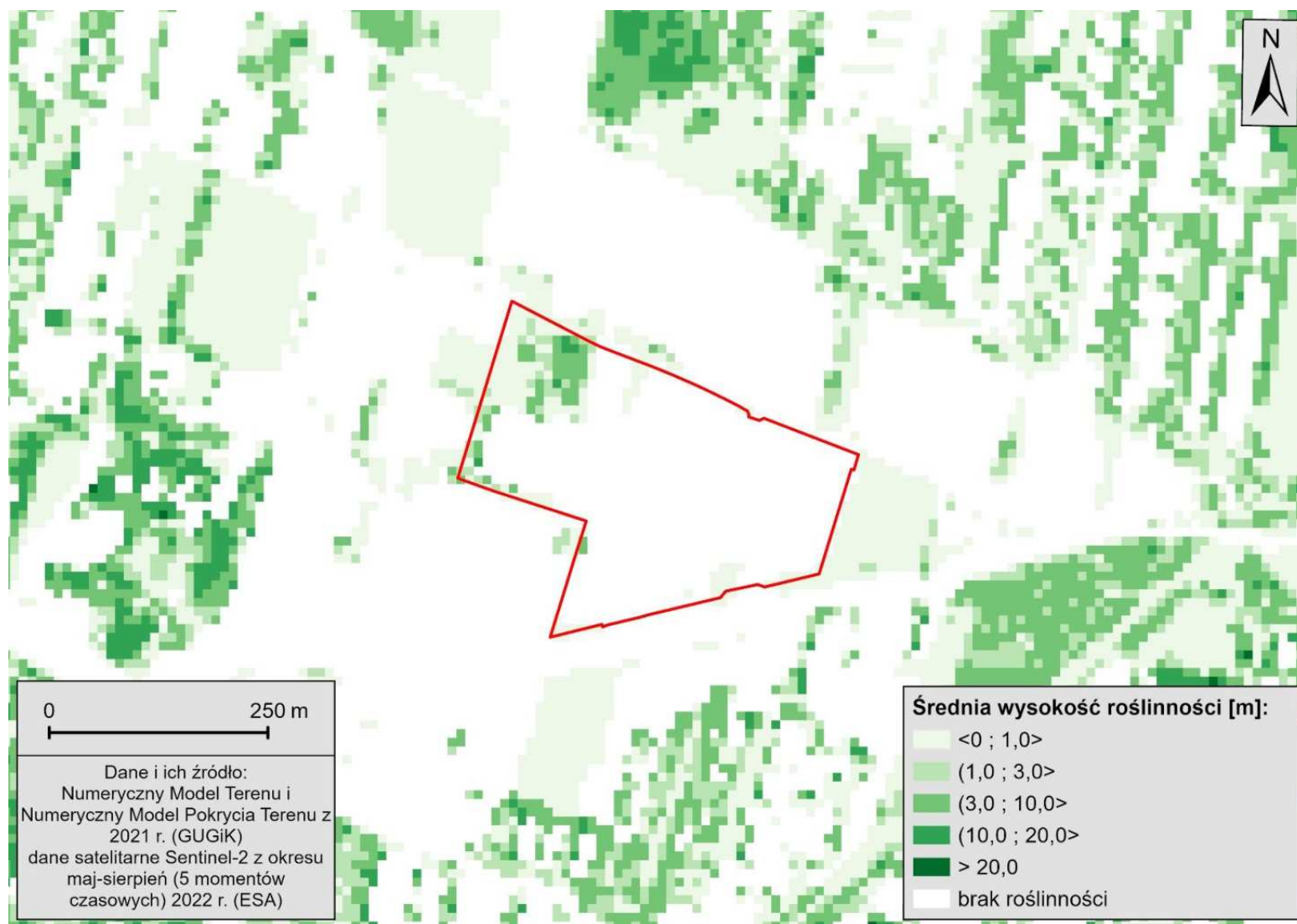
Zabudowa: Punktem centralnym jest budynek wielkopowierzchniowy, w którym mieści się sklep IKEA oraz parking przed budynkiem. Wokoło zabudowa mieszana: wielkopowierzchniowe budynki, zabudowa blokowa, willowa oraz biurowce. Obecność budynków ze wszystkich przedziałów wysokości (do 5 m, 5-10 m, 10-30 m i ponad 30 m wysokości). Średnia wysokość zabudowy na tym obszarze wynosi 8,58 m (ryc. 21, 22, 23, 24).



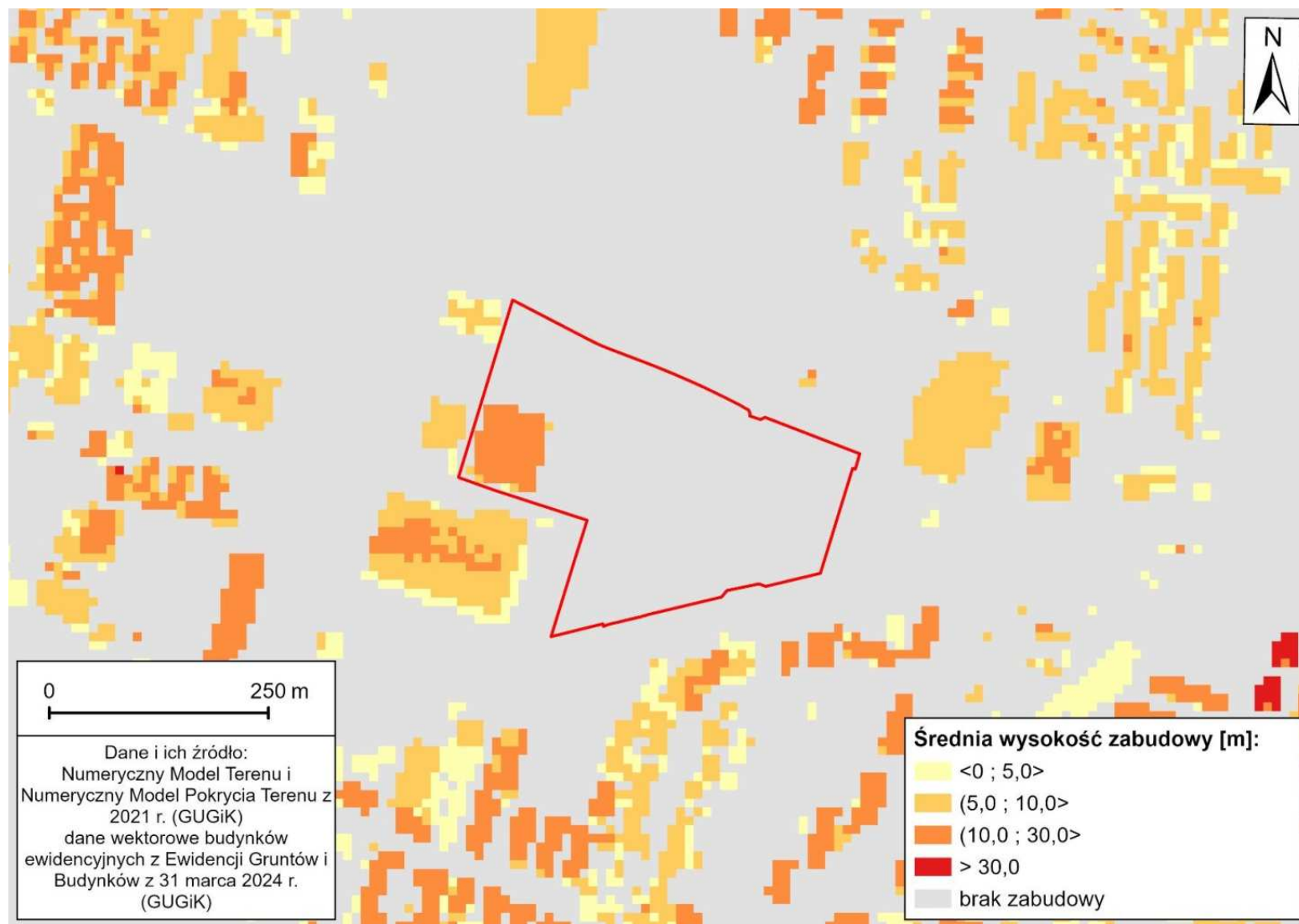
Ryc. 21. Obszar „IKEA” na ortofotomapie w skali barwnej RGB (górna część) i CIR (dolna część)



Ryc. 22. Obszar „IKEA” na mapie wartości wskaźnika NDVI



Ryc. 23. Obszar „IKEA” na mapie średnich wysokości roślinności



Ryc. 24. Obszar „IKEA” na mapie średnich wysokości zabudowy

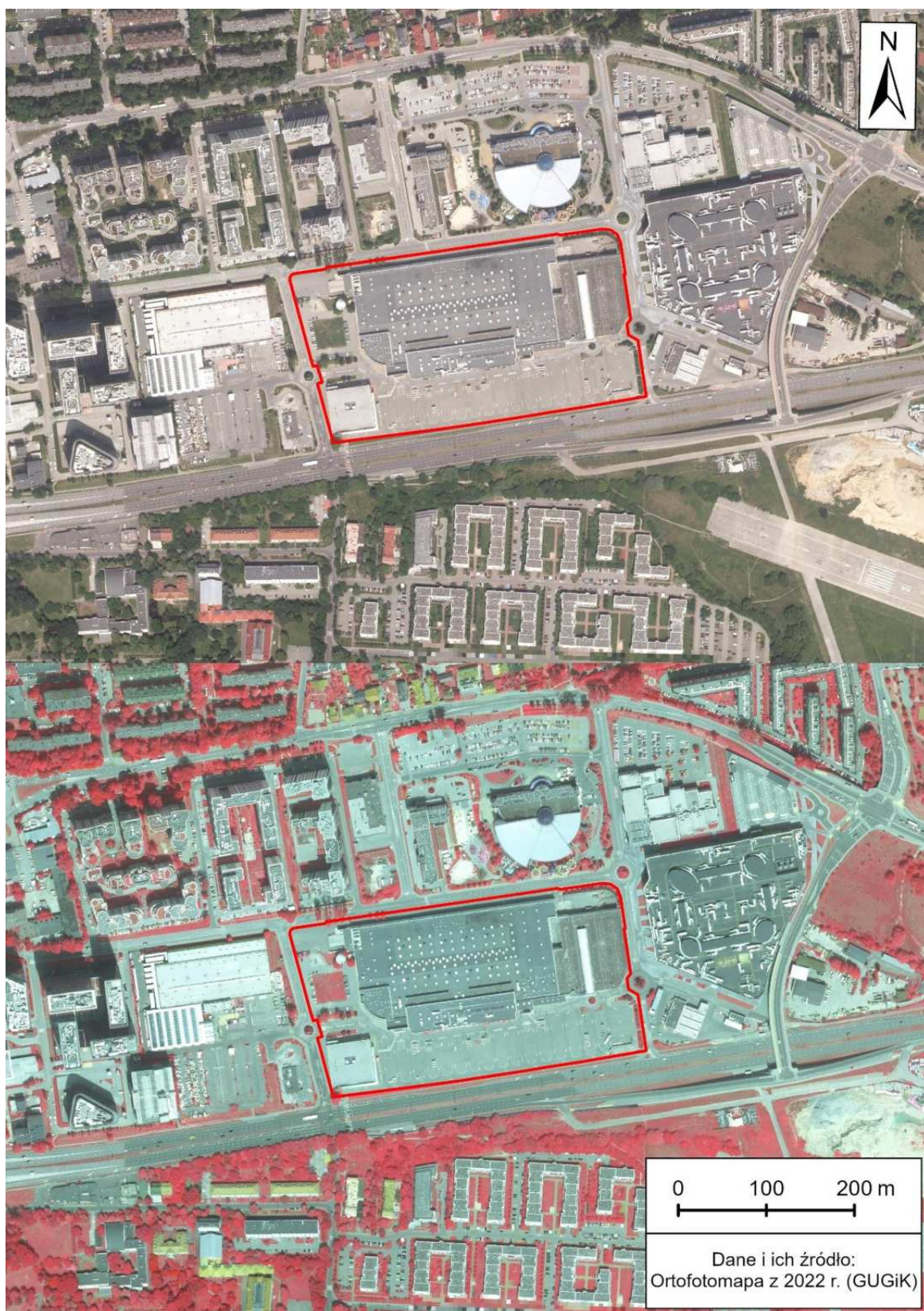
Parking przy CH Serenada

Ukształtowanie terenu i wysokość bezwzględna: Obszar ten leży na granicy dwóch mezoregionów: Płaskowyżu Proszowickiego i Niziny Nadwiślańskiej (Solon i in. 2018), na średniej wysokości 222,98 m n.p.m.

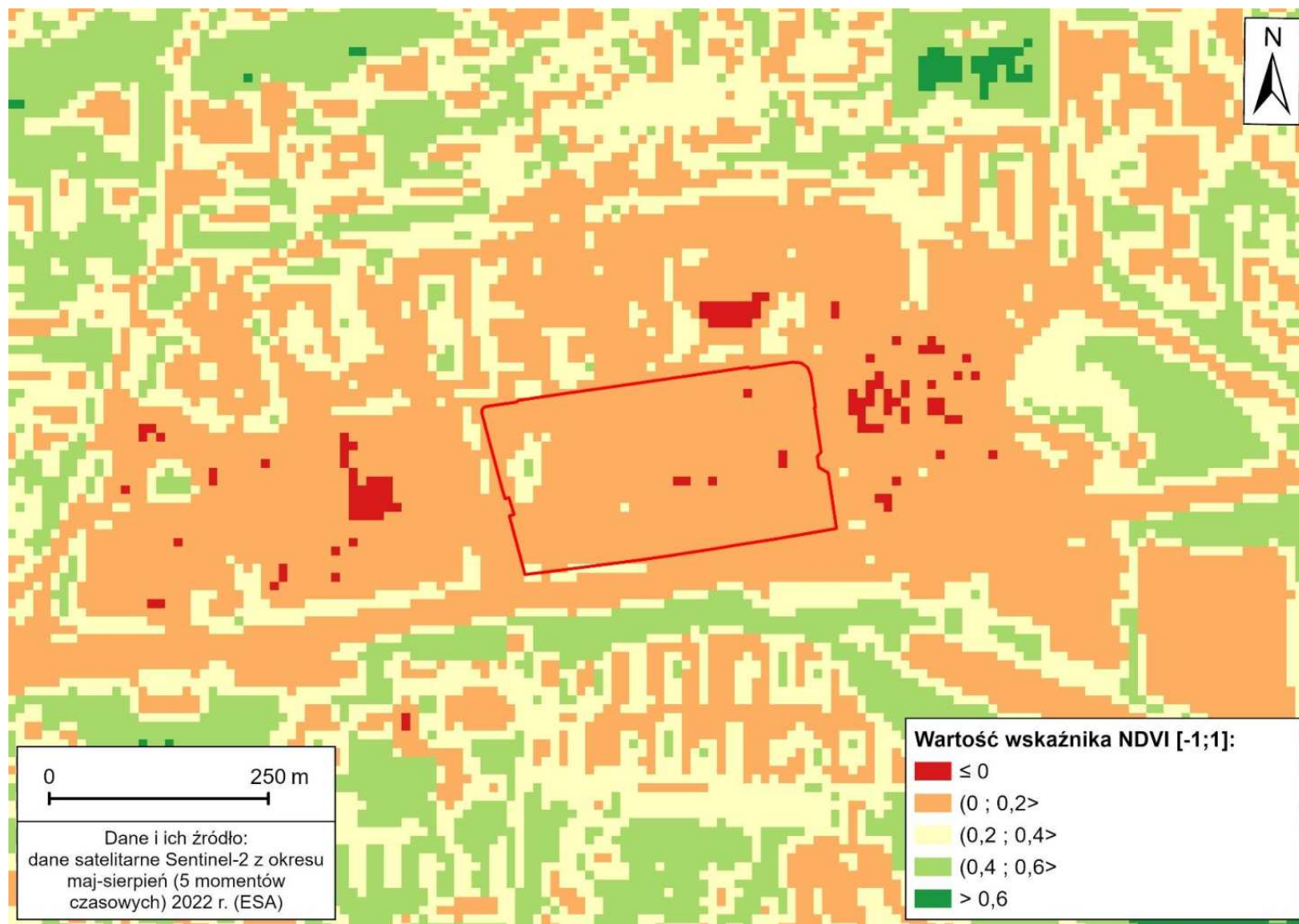
Wskaźnik NDVI i struktura pokrycia terenu: Wskaźnik NDVI w najbliższym sąsiedztwie parkingu przyjmuje niskie wartości (0-0,2, rzadziej 0,2-0,4), w promieniu 300 m na południu znajdują się obszary zieleni o nieco większych wartościach (0,4-0,6). Są to obszary zieleni odgraniczające Aleję Generała Tadeusza Bora-Komorowskiego od osiedli mieszkaniowych oraz trawniki i niewielkie zadrzewienia i zakrzaczenia w obrębie osiedli, a także obszary zieleni niskiej w bezpośrednim sąsiedztwie płyty nieczynnego lotniska. Średnia wartość NDVI na tym obszarze wynosi 0,178.

Roślinność: Roślinność w najbliższym sąsiedztwie parkingu prawie nie występuje – są to tylko pojedyncze drzewa lub niewielkie trawniki. Większe połacie zieleni występują na południu (kilkadziesiąt metrów od granicy obszaru) oraz północy (ponad ok. 200-300 m od granicy obszaru). W obrębie około 200-300 m na północ zaczyna się obszar o mieszanej zabudowie i większym udziale zieleni pomiędzy budynkami. Około 250 m na wschód od granicy parkingu leży granica nieużytku porośniętego roślinnością trawiasto-krzewiastą. Średnia wysokość roślinności to 3,77 m.

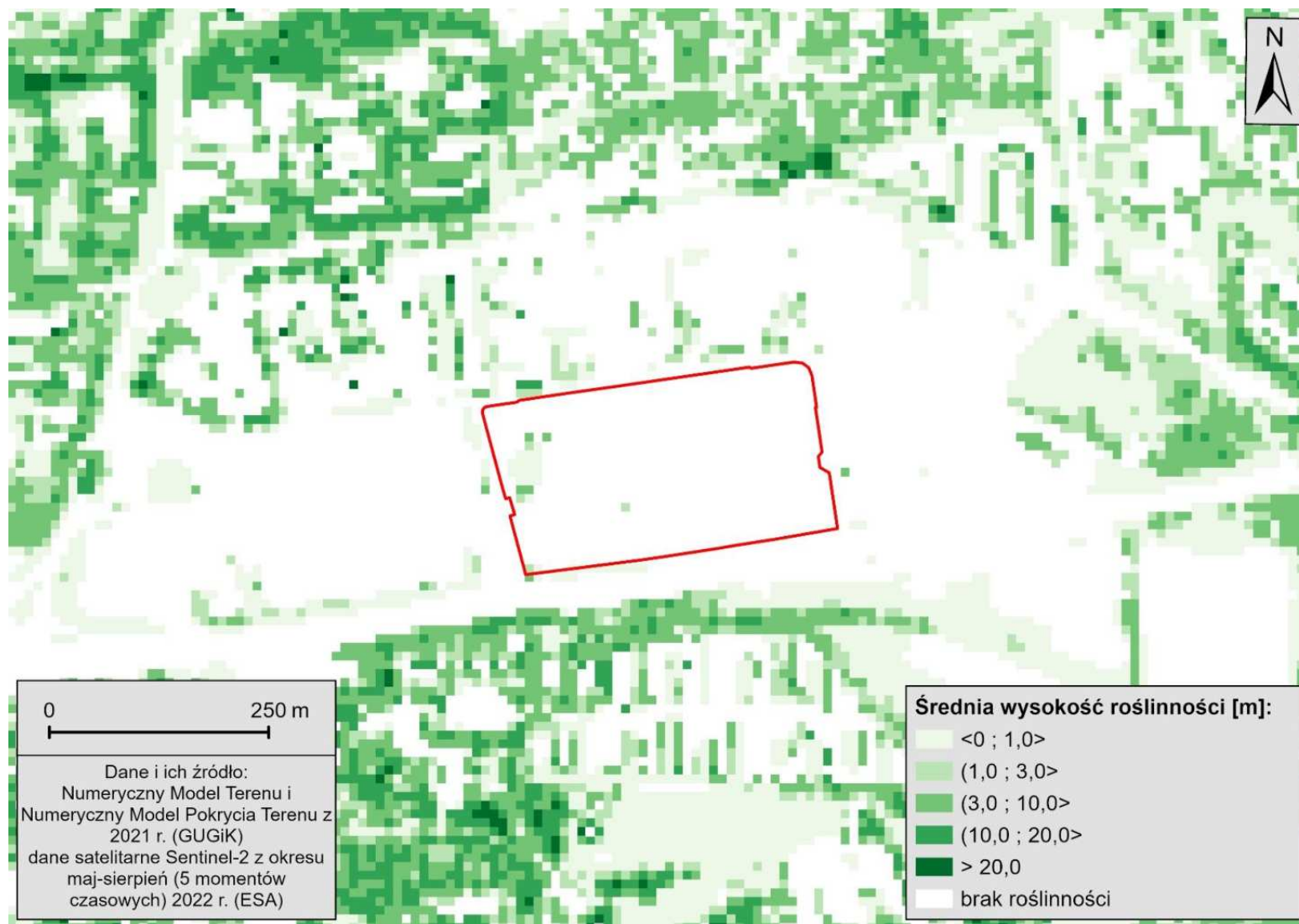
Zabudowa: Parking znajduje się w sąsiedztwie budynków wielkopowierzchniowych: CH Serenada i CH Krokus. Na południu od parkingu znajdują się osiedla bloków mieszkaniowych raz nieczynne lotnisko Rakowice Czyżyny. Od północy, wschodu i zachodu parking otaczają budynki o przeznaczeniu usługowo-handlowym, mieszkaniowym oraz biurowce. W obrębie około 200-300 m na północ zaczyna się obszar o mieszanej zabudowie blokowej i willowej. W obrębie badanego obszaru znajduje się zarówno zabudowa willowa (5-10 m), blokowa i usługowo-handlowa (10-30 m), ale także wyższe bloki mieszkaniowe i biurowce (ponad 30 m wysokości). Średnia wysokość zabudowy wynosi 14,23 m (ryc. 25, 26, 27, 28).



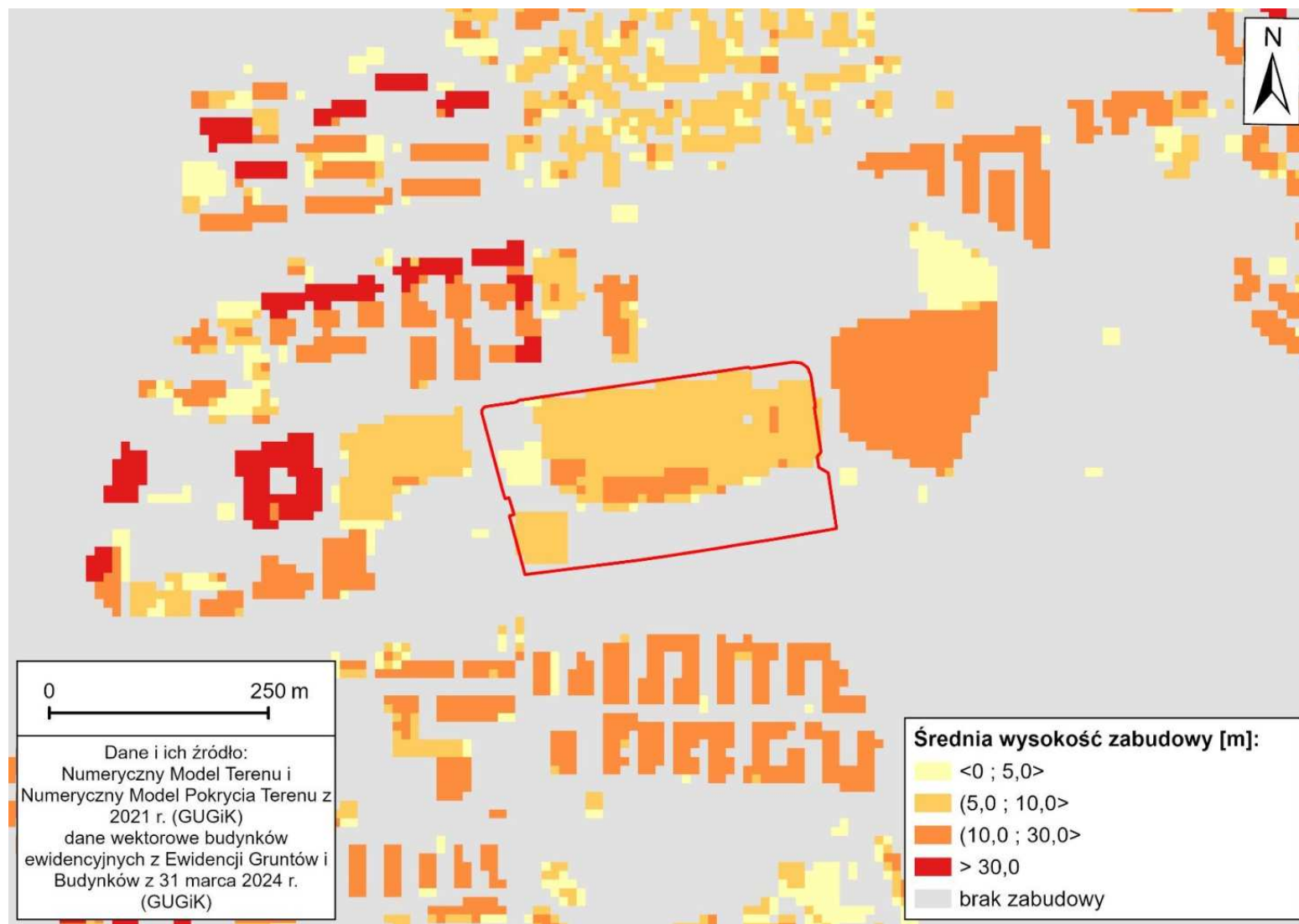
Ryc. 25. Obszar „CH Serenada” na ortofotomapie w skali barwnej RGB (górna część) i CIR (dolna część)



Ryc. 26. Obszar „CH Serenada” na mapie wartości wskaźnika NDVI



Ryc. 27. Obszar „CH Serenada” na mapie średnich wysokości roślinności



Ryc. 28. Obszar „CH Serenada” na mapie średnich wysokości zabudowy

Parking przy CH Zakopianka

Ukształtowanie terenu i wysokość bezwzględna: Średnia wysokość bezwzględna na tym terenie wynosi 220,34 m n.p.m. Leży on na granicy mezoregionów: Podgórze Krakowskiego i Pomostu Krakowskiego (Solon i in. 2018).

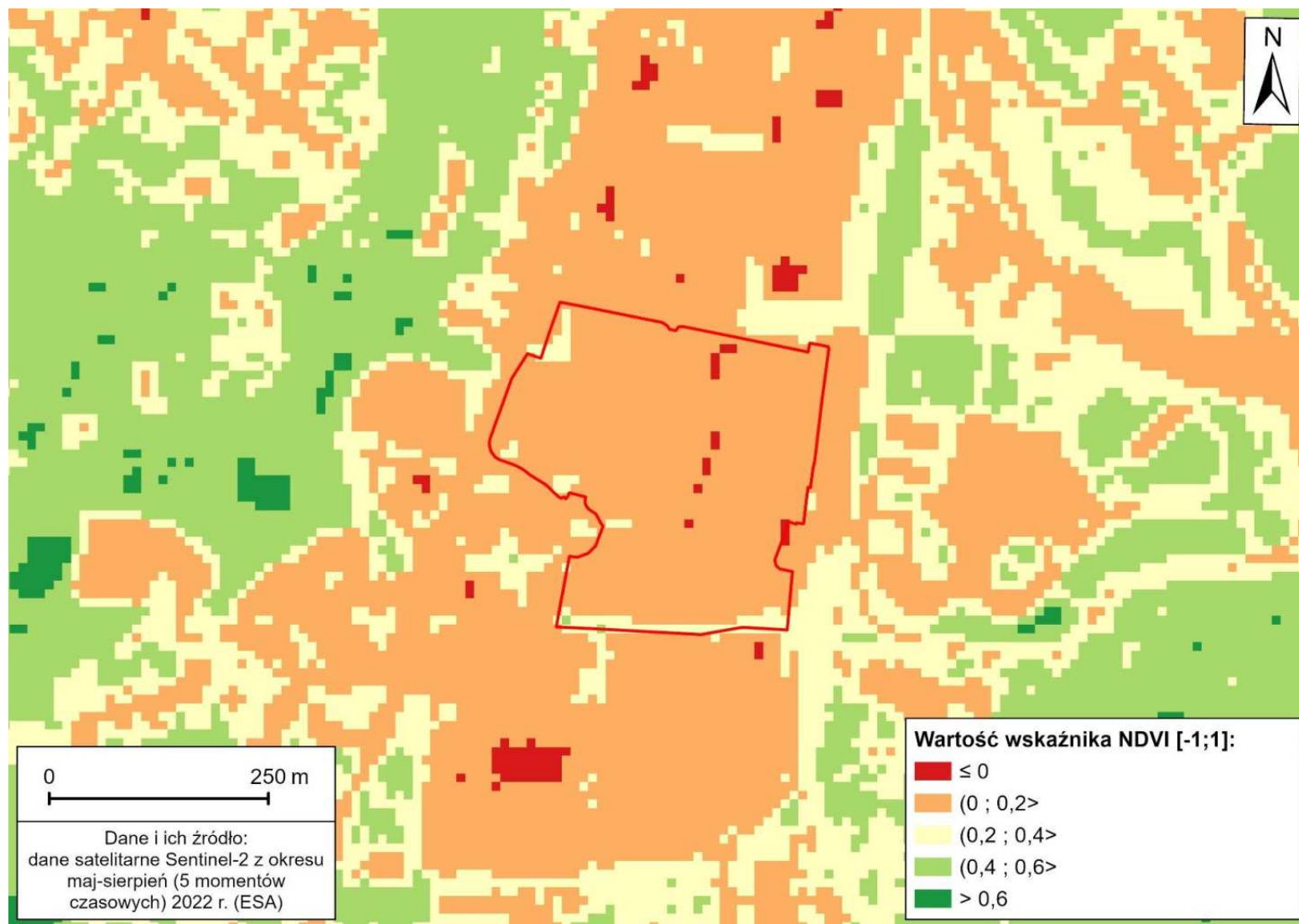
Wskaźnik NDVI i struktura pokrycia terenu: Obszar centralny: zabudowania oraz parkingi, a także obszary położone na północ i południe od niego cechują się niską wartością wskaźnika, przyjmując w większości wartości od 0 do 0,2. Również położone na wschód od granicy projektowanego obszaru sanktuarium i jego otoczenie na dużym obszarze przyjmuje takie wartości, na zmianę z wartościami z zakresu 0,2-0,4 i 0,4-0,6. Po zachodniej stronie ulicy Zakopiańskiej, w obszarze zabudowy wskaźnik NDVI przyjmuje wartości 0-0,2, ale na obszarze parku wartości NDVI rosną – w większości przyjmują wartość od 0,4 do 0,6, ale niewielkie obszary również powyżej 0,6. Średnia wartość wskaźnika NDVI dla tego obszaru wynosi 0,180.

Roślinność: Obszary zielone na obszarze parkingów i wokół Galerii Zakopianka występują w postaci niewielkich połąci trawników lub pojedynczych drzew, podobnie na północy i południu. Po zachodniej stronie badanego obszaru dominuje parkowa zieleń wysoka, zaś po wschodniej zieleń niska, z niewielkimi obszarami zadrzewień. Średnia wysokość roślinności dla tego obszaru wynosi 4,91.

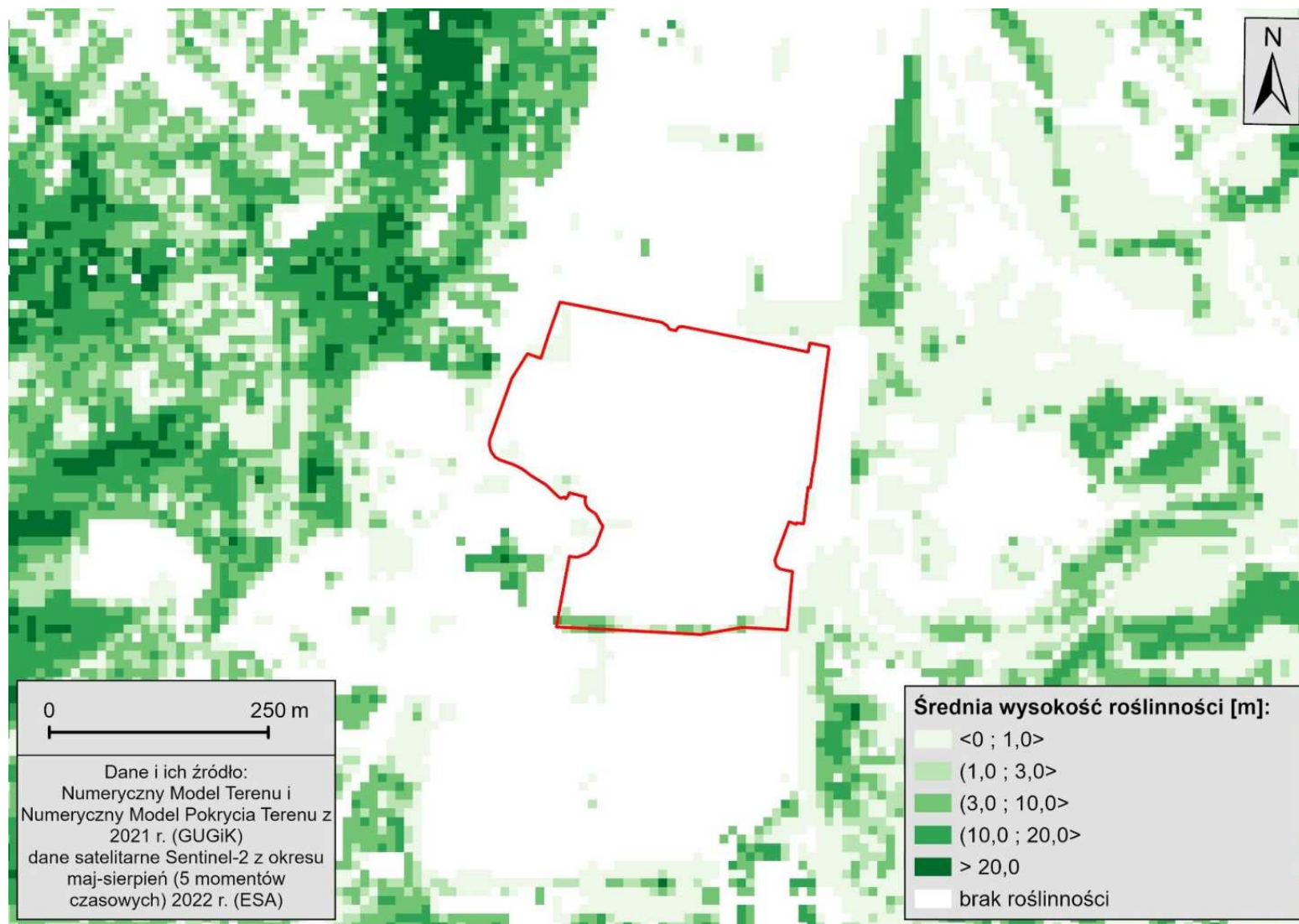
Zabudowa: Zabudowa to głównie wielkopowierzchniowe budynki o charakterze handlowo-usługowym, na zachodzie również zabudowa willowa. Wysokość zabudowy to w głównej mierze budynki w przedziale 5-10 m oraz 10-30 m, część zabudowy willowej nie przekracza 5 m wysokości. Średnia wysokość zabudowy w tym obszarze wynosi 9,22 m (ryc. 29, 30, 31, 32).



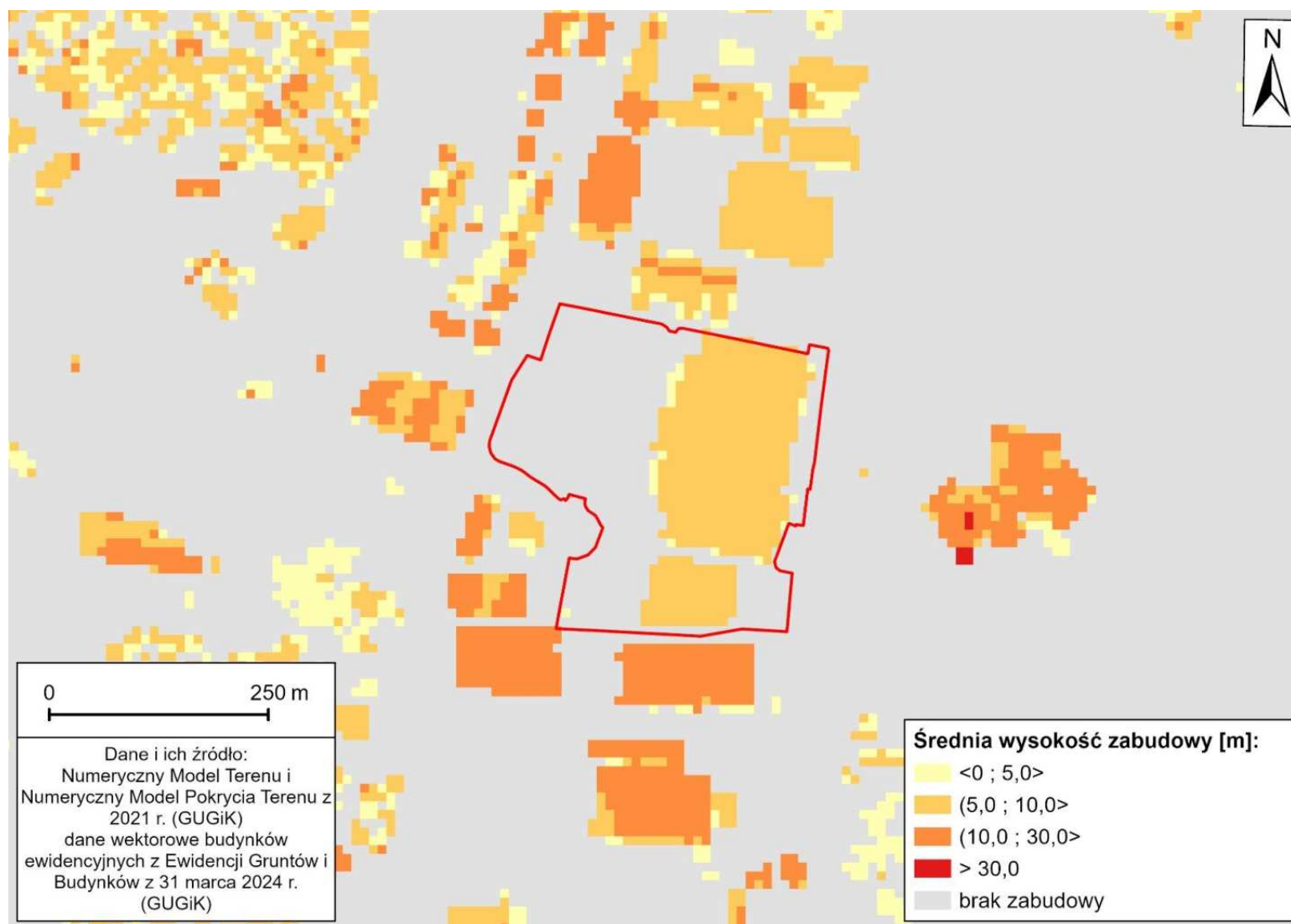
Ryc. 29. Obszar „CH Zakopianka” na ortofotomapie w skali barwnej RGB (górna część) i CIR (dolna część)



Ryc. 30. Obszar „CH Zakopianka” na mapie wartości wskaźnika NDVI



Ryc. 31. Obszar „CH Zakopianka” na mapie średnich wysokości roślinności



Ryc. 32. Obszar „CH Zakopianka” na mapie średnich wysokości zabudowy

Rynek Podgórski

Ukształtowanie terenu i wysokość bezwzględna: Rynek Podgórski i jego otoczenie leżą w bliskim sąsiedztwie Wisły, w jej dolinie, na średniej wysokości wynoszącej 206,96 m.

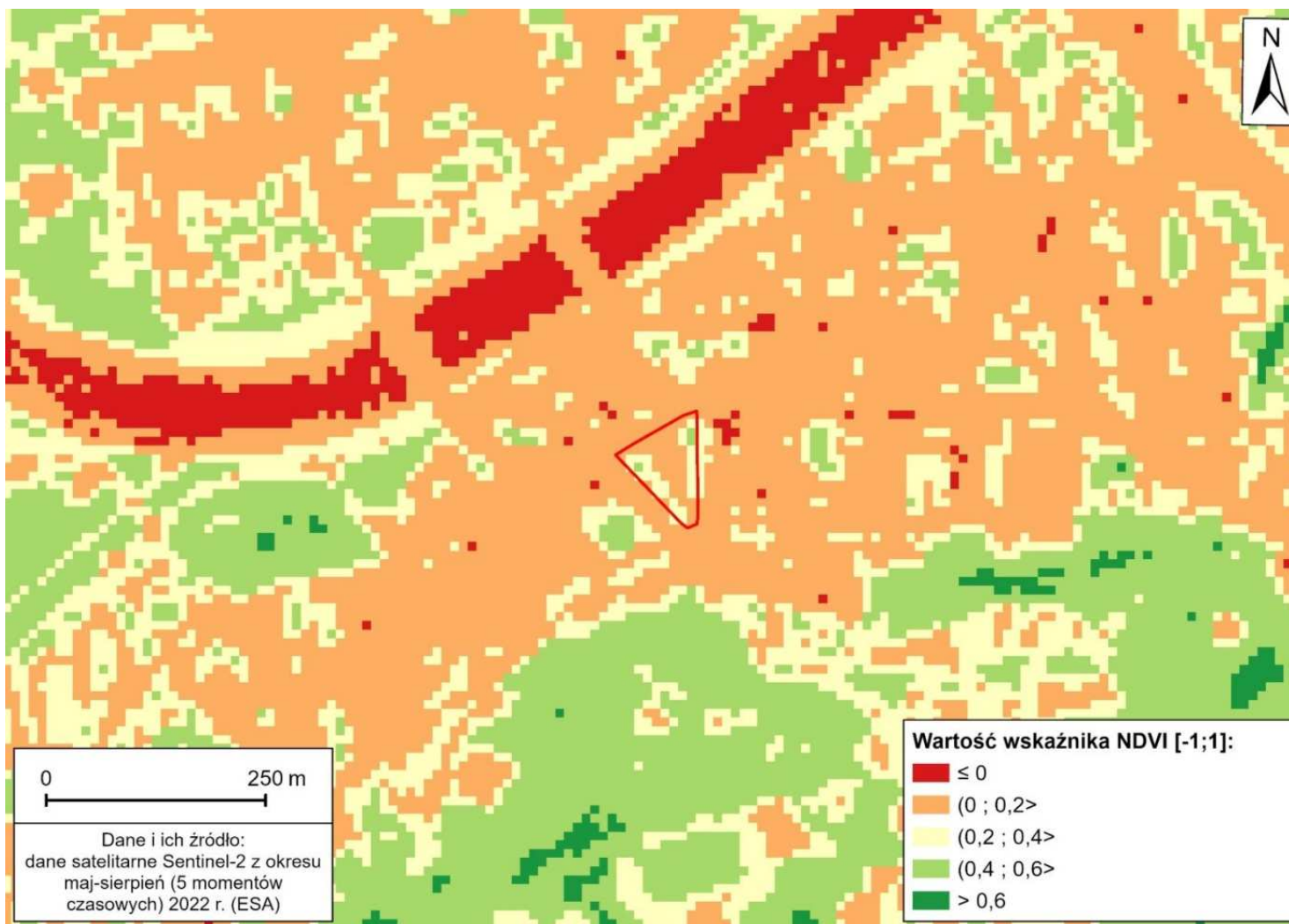
Wskaźnik NDVI i struktura pokrycia terenu: Wyraźna widoczna granica pomiędzy strefą zabudowaną a obszarami zielonymi. Na obszarze występowania zabudowy z uwagi na wąskie ulice w tej części miasta prawie nie występują obszary zielone, nawet w postaci zieleni niskiej. Występują jedynie pojedyncze drzewa lub niewielkie połacie zieleni, ale rzadko są dostępne z obszaru ulicy, głównie występują w podwórzach kamienic. Tereny te cechują się niską wartością wskaźnika NDVI (0-0,2). Dobrze widoczne obszary zieleni wysokiej w postaci Plant im. Floriana Nowackiego oraz parku im. Wojciecha Bednarskiego (wartości wskaźnika NDVI w przedziale 0,4-0,6). Obszar bulwarów położonych bezpośrednio w sąsiedztwie Wisły przyjmuje wartości z dwóch zakresów: 0-0,2 i 0,2-0,4. Tereny te porośnięte są niezbyt bujną zielenią niską, o ograniczonej aktywności fotosyntezy. Średnia wartość NDVI dla tego obszaru może być nieco zaniżona przez sąsiedztwo rzeki (woda zazwyczaj cechuje się ujemnym wskaźnikiem NDVI) i wynosi 0,181.

Roślinność: Roślinność niska (0-1,0 m wysokości) w bezpośrednim sąsiedztwie rzeki (bulwary) oraz wysoka (powyżej 3,0 m) w obrębie parków. Średnia wysokość roślinności na tym obszarze wynosi 9,66 m.

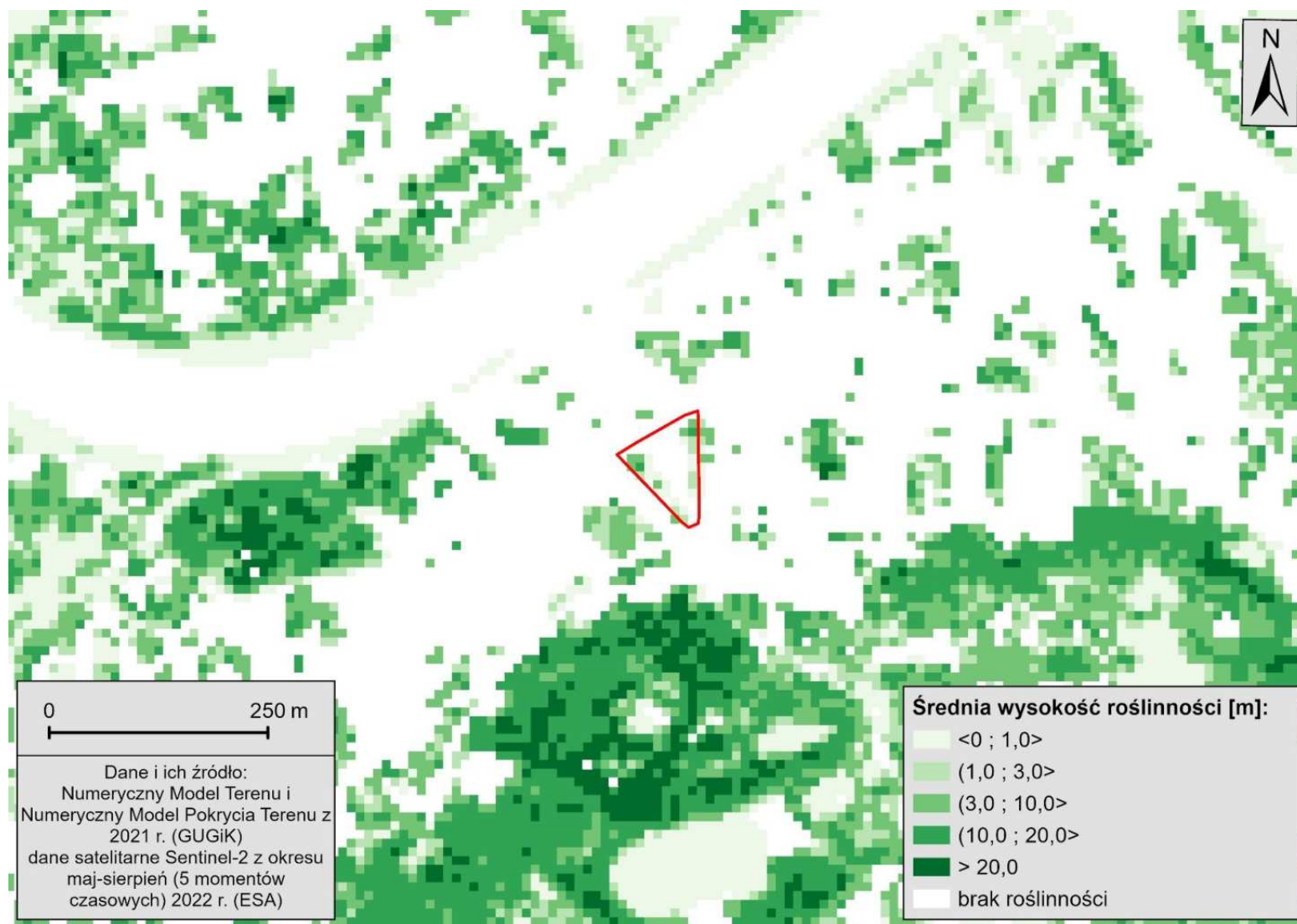
Zabudowa: Zwarta zabudowa staromiejska w postaci kamienic, w większości przypadków o wysokości między 10,0 a 30,0 m. Średnia wysokość zabudowy na tym terenie to 11,87 m (ryc. 33, 34, 35, 36).



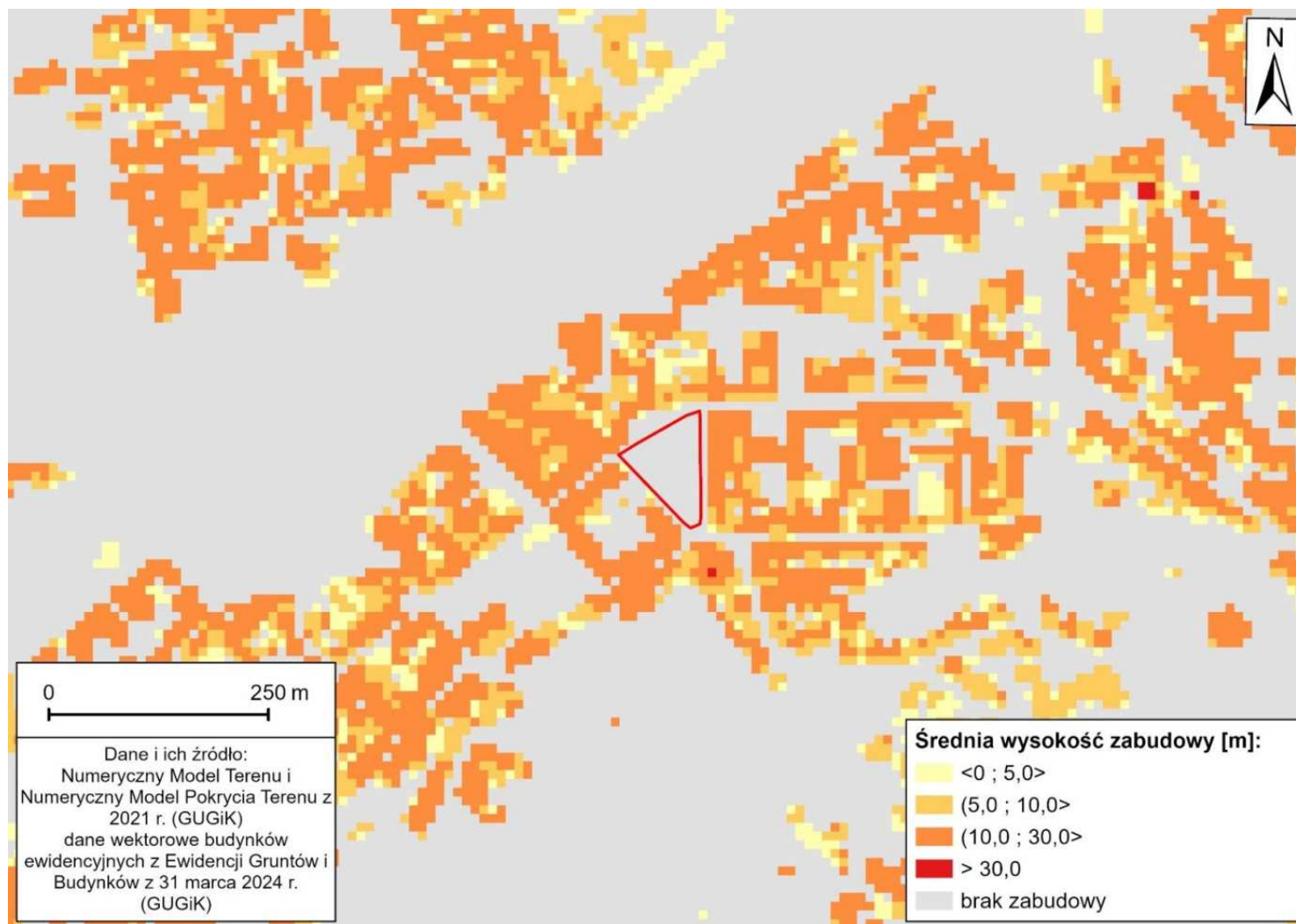
Ryc. 33. Obszar „Rynek Podgórski” na ortofotomapie w skali barwnej RGB (górna część) i CIR (dolna część)



Ryc. 34. Obszar „Rynek Podgórski” na mapie wartości wskaźnika NDVI



Ryc. 35. Obszar „Rynek Podgórski” na mapie średnich wysokości roślinności



Ryc. 36. Obszar „Rynek Podgórski” na mapie średnich wysokości zabudowy

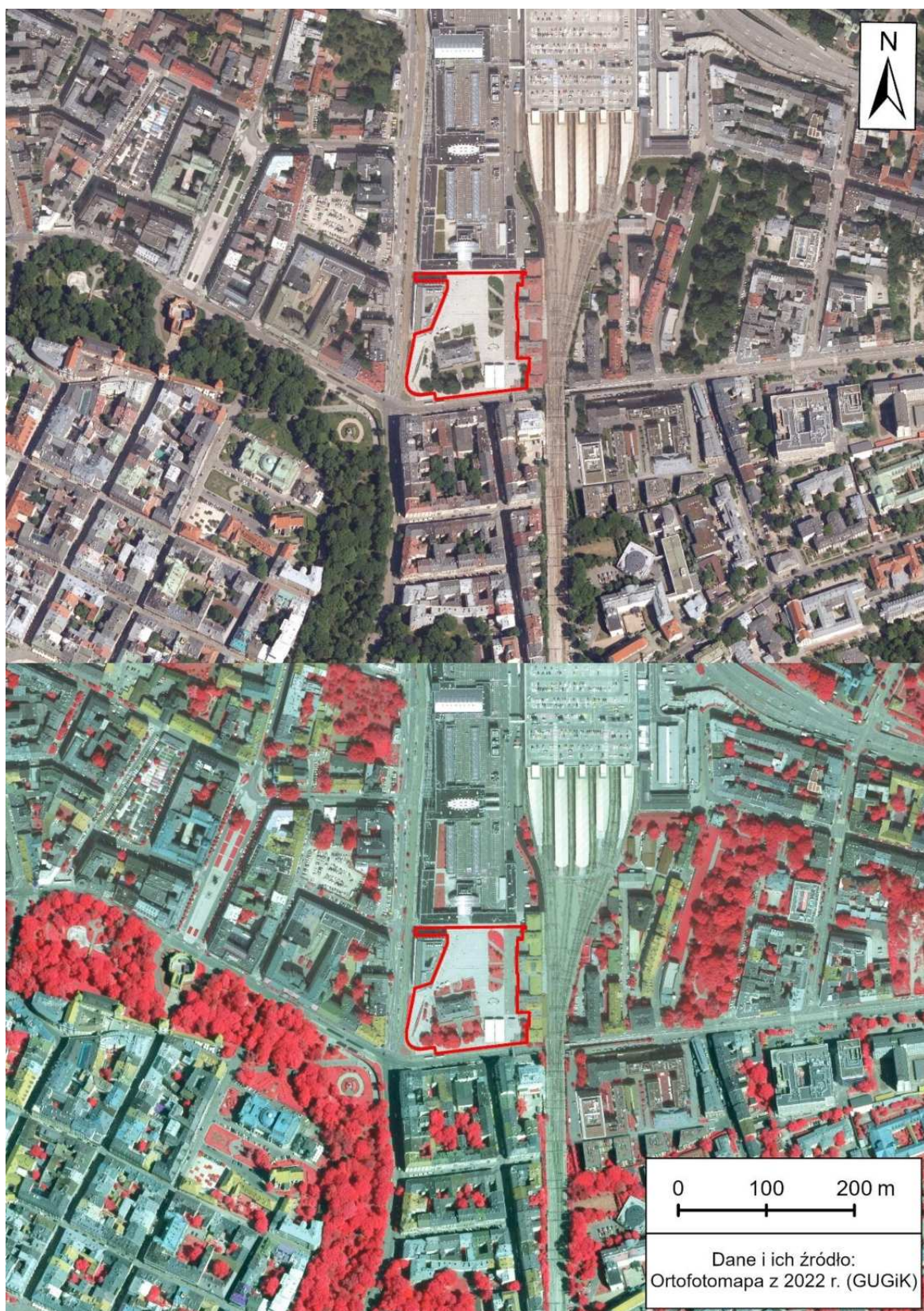
Plac Jana Nowaka Jeziorańskiego

Ukształtowanie terenu i wysokość bezwzględna: Średnia wysokość bezwzględna na tym obszarze wynosi 213,68 m n.p.m., w obrębie mezoregionu Pomostu Krakowskiego (Solon i in. 2018).

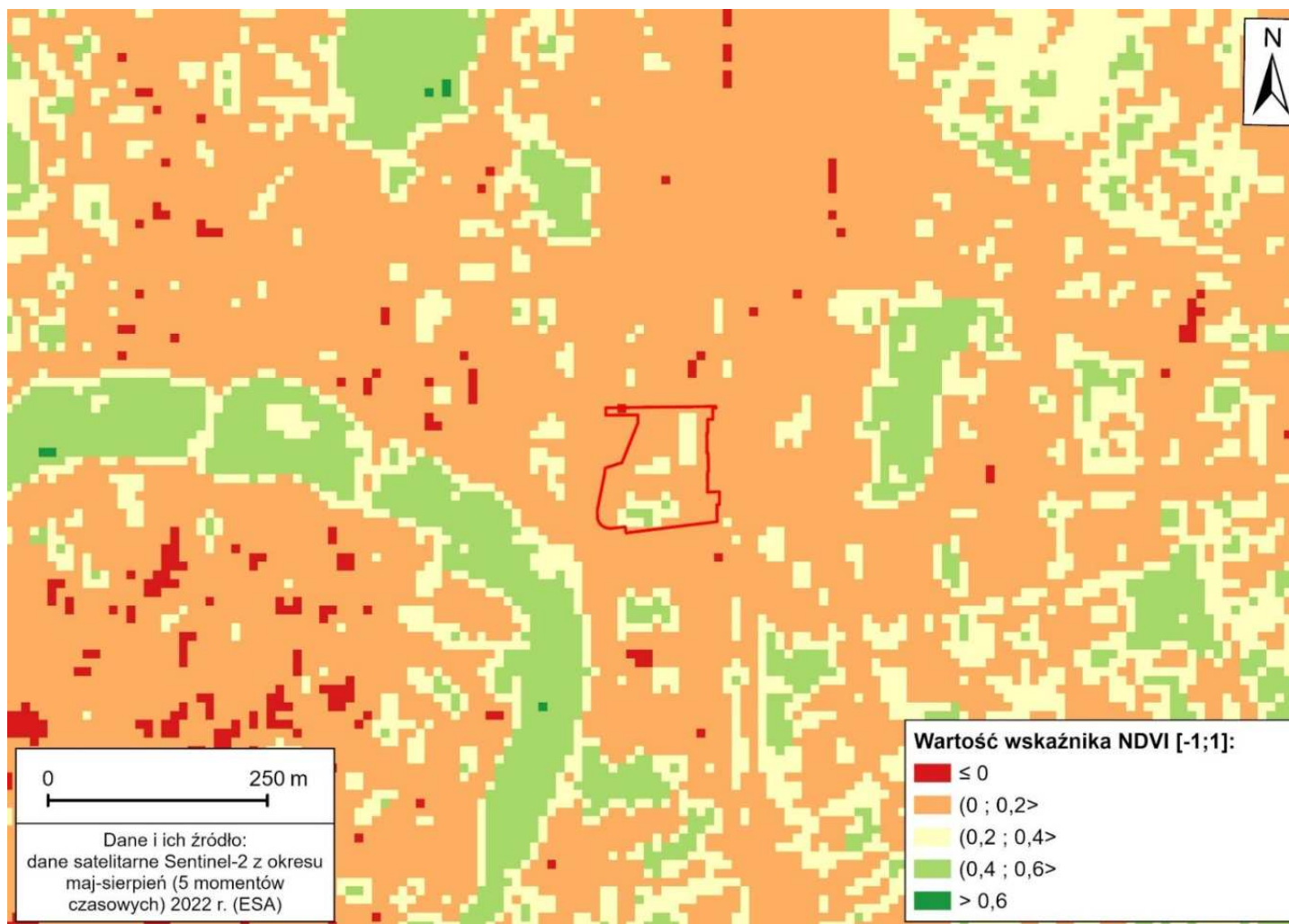
Wskaźnik NDVI i struktura pokrycia terenu: Obszar centrum miasta, o bardzo wyraźnej antropopresji – duże połacie terenu o niskiej wartości NDVI (0-0,2), z niewielkim udziałem terenów porośniętych roślinnością (szczególnie widoczne są Planty Krakowskie, Park Jalu Kurka i Park Strzelecki). Obszary zieleni wysokiej przyjmują wartości wskaźnika NDVI z zakresu 0,4-0,6. Średnia wartość wskaźnika NDVI dla tego obszaru wynosi 0,158 i jest najniższa ze wszystkich 12 lokalizacji.

Roślinność: Bardzo mały udział terenów zielonych. Jeżeli występują, to głównie w postaci parków. Przeważa zatem roślinność wysoka, w większości powyżej 10,0 m wysokości. Średnia wysokość roślinności na tym obszarze wynosi 8,50 m.

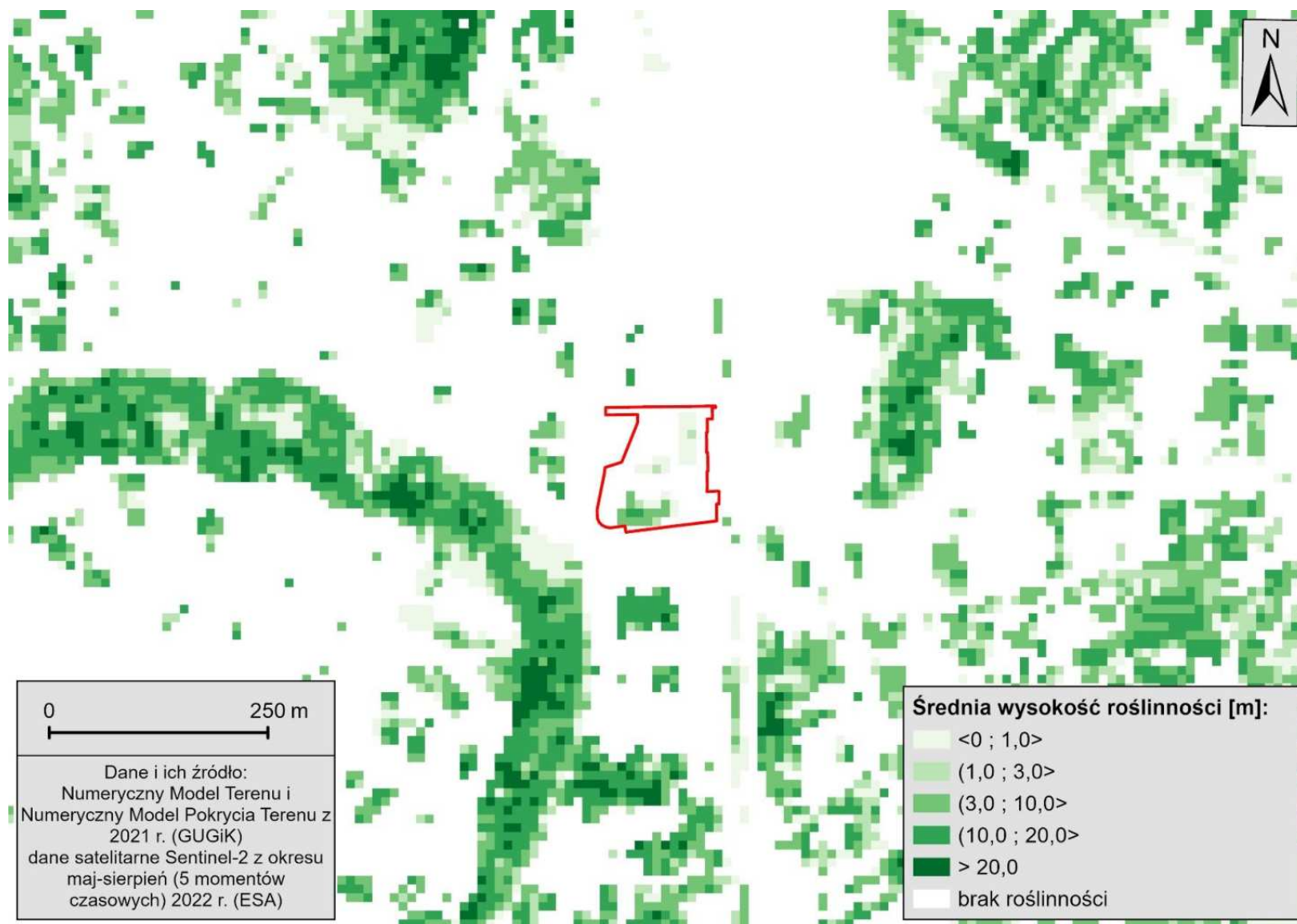
Zabudowa: Gęsta i wysoka zabudowa śródmiejska, głównie w postaci kamienic, ale również wielkopowierzchniowego centrum handlowego i infrastruktury kolejowej. Średnia wysokość zabudowy na tym obszarze wynosi 14,50 m (ryc. 37, 38, 39, 40).



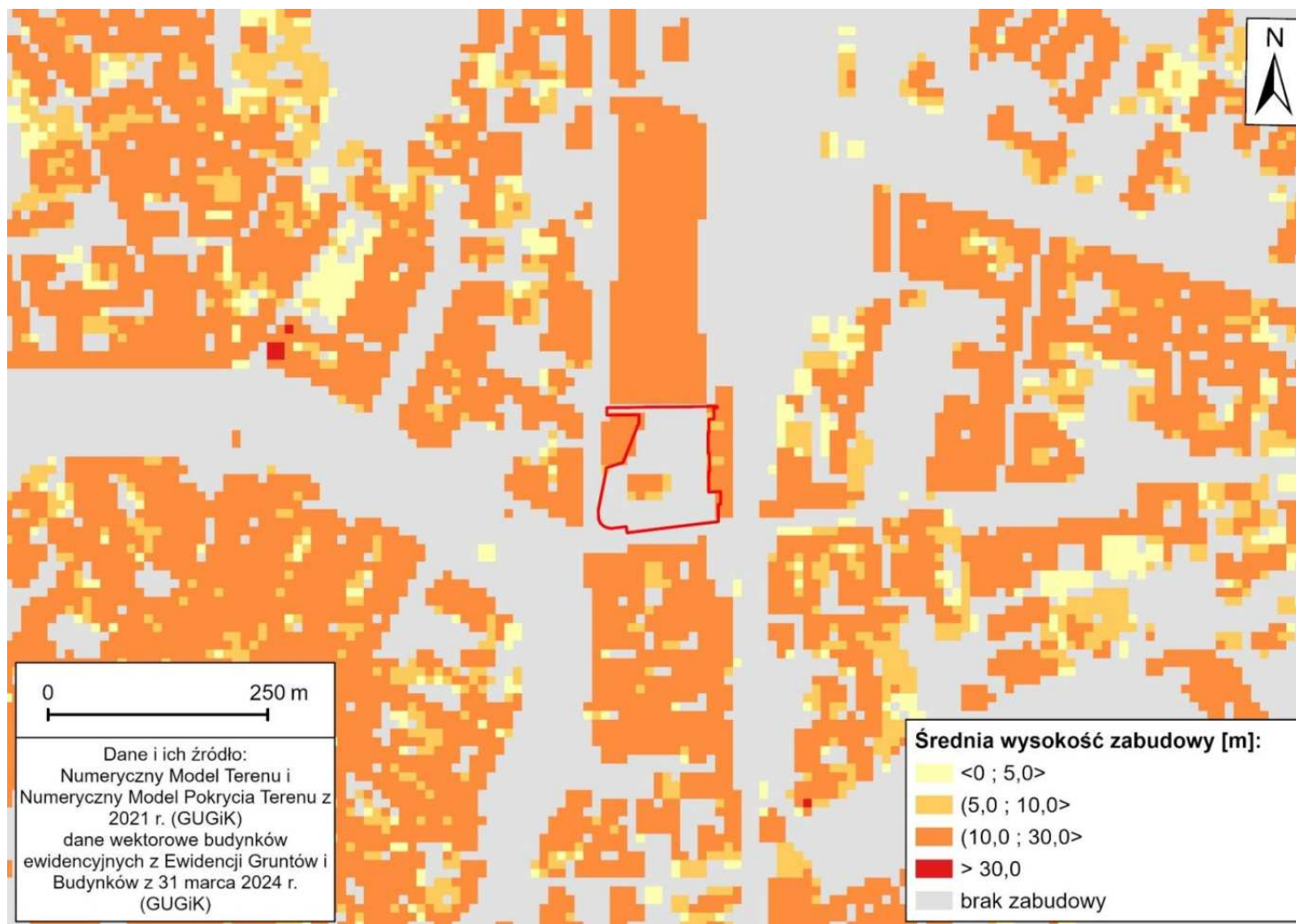
Ryc. 37. Obszar „Plac Jana Nowaka Jeziorańskiego” na ortofotomapie w skali barwnej RGB (górna część) i CIR (dolna część)



Ryc. 38. Obszar „Plac Jana Nowaka Jeziorańskiego” na mapie wartości wskaźnika NDVI



Ryc. 39. Obszar „Plac Jana Nowaka Jeziorańskiego” na mapie średnich wysokości roślinności



Ryc. 40. Obszar „Plac Jana Nowaka Jeziorańskiego” na mapie średnich wysokości zabudowy

Nowy Kleparz

Ukształtowanie terenu i wysokość bezwzględna: Średnia wysokość bezwzględna tego obszaru wynosi 215,17 m n.p.m., w obrębie Pomostu Krakowskiego (Solon i in. 2018).

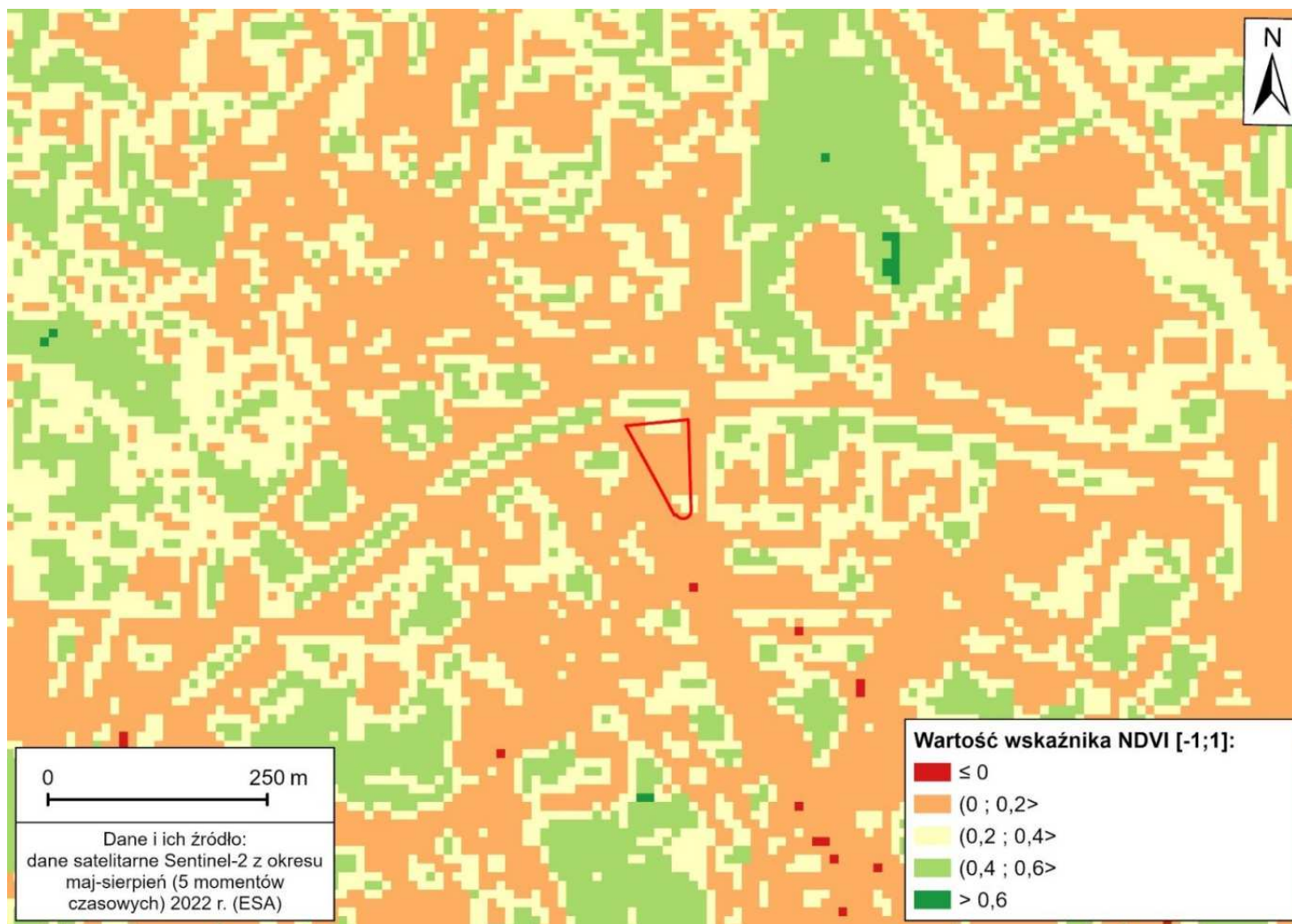
Wskaźnik NDVI i struktura pokrycia terenu: Plac targowy „Nowy Kleparz” leży pomiędzy ulicą Długą i Aleją Juliusza Słowackiego. Otoczony jest staromiejską zabudową w postaci kamienic (stąd w najbliższym jego sąsiedztwie przeważa udział pokrycia terenu o wartościach wskaźnika NDVI od 0 do 0,2, choć w pobliżu znajduje się również nieco zieleni w postaci drzew (m. in. Park Kleparski) i trawników pomiędzy jezdniami i w podwórzach budynków (wartości wskaźnika NDVI w zakresie 0,2-0,4 oraz 0,4-0,6). Średnia wartość wskaźnika NDVI dla tego terenu to 0,200.

Roślinność: Zieleń mieszana, zarówno niska (0-1,0 m wysokości), średnia (1,0-3,0 m wysokości), jak również wysoka (zakresy: 3,0-10,0 m i 10,0-20,0 m, a nawet powyżej 20 m wysokości), z niewielką przewagą zieleni wysokiej. Średnia wysokość zieleni na tym obszarze wynosi 7,49 m.

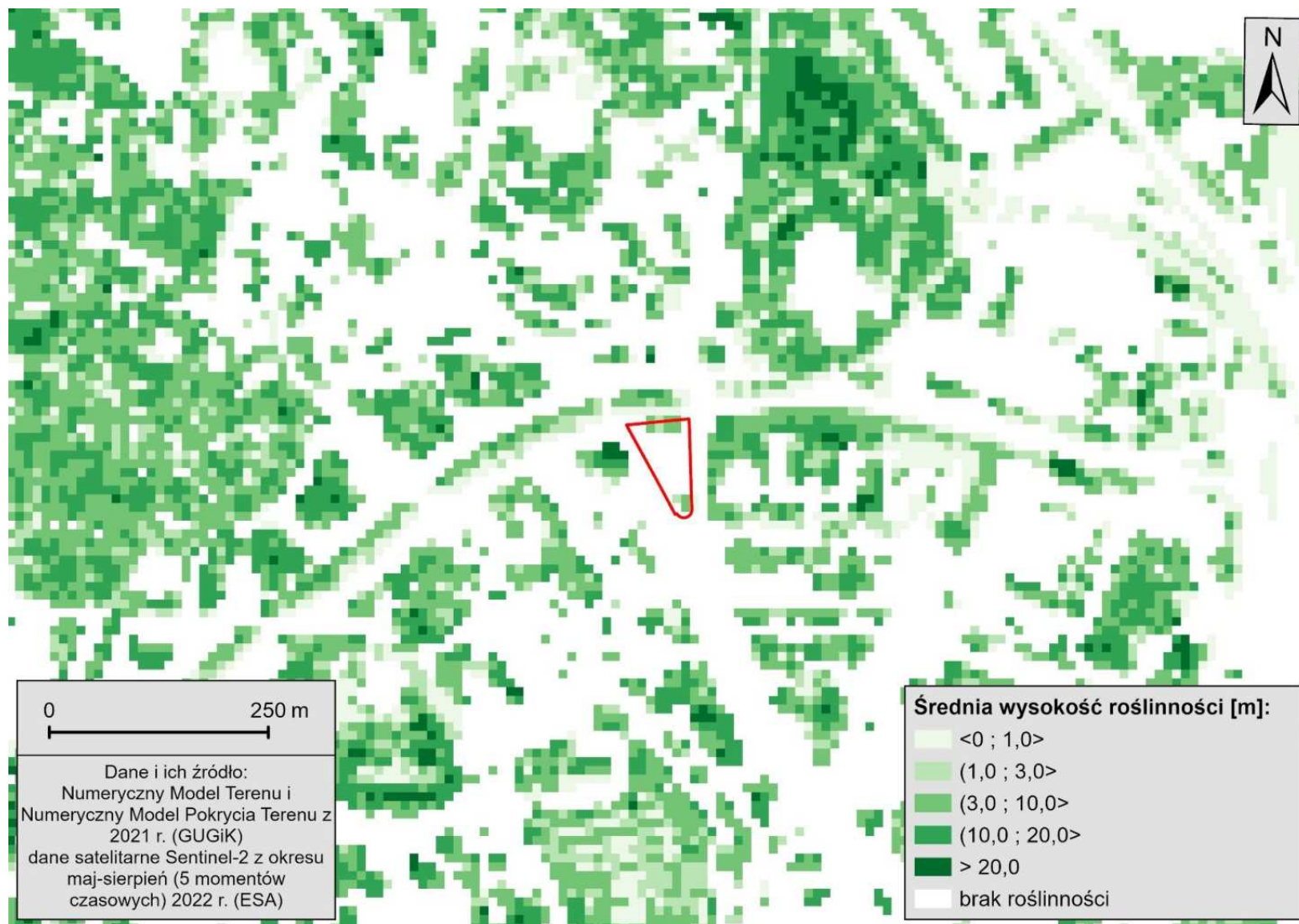
Zabudowa: Zdecydowana przewaga zabudowy kamienicowej, o wysokościach od 10,0 do 30,0 m. Średnia wysokość zabudowy na tym terenie wynosi 12,96 m (ryc. 41, 42, 43, 44).



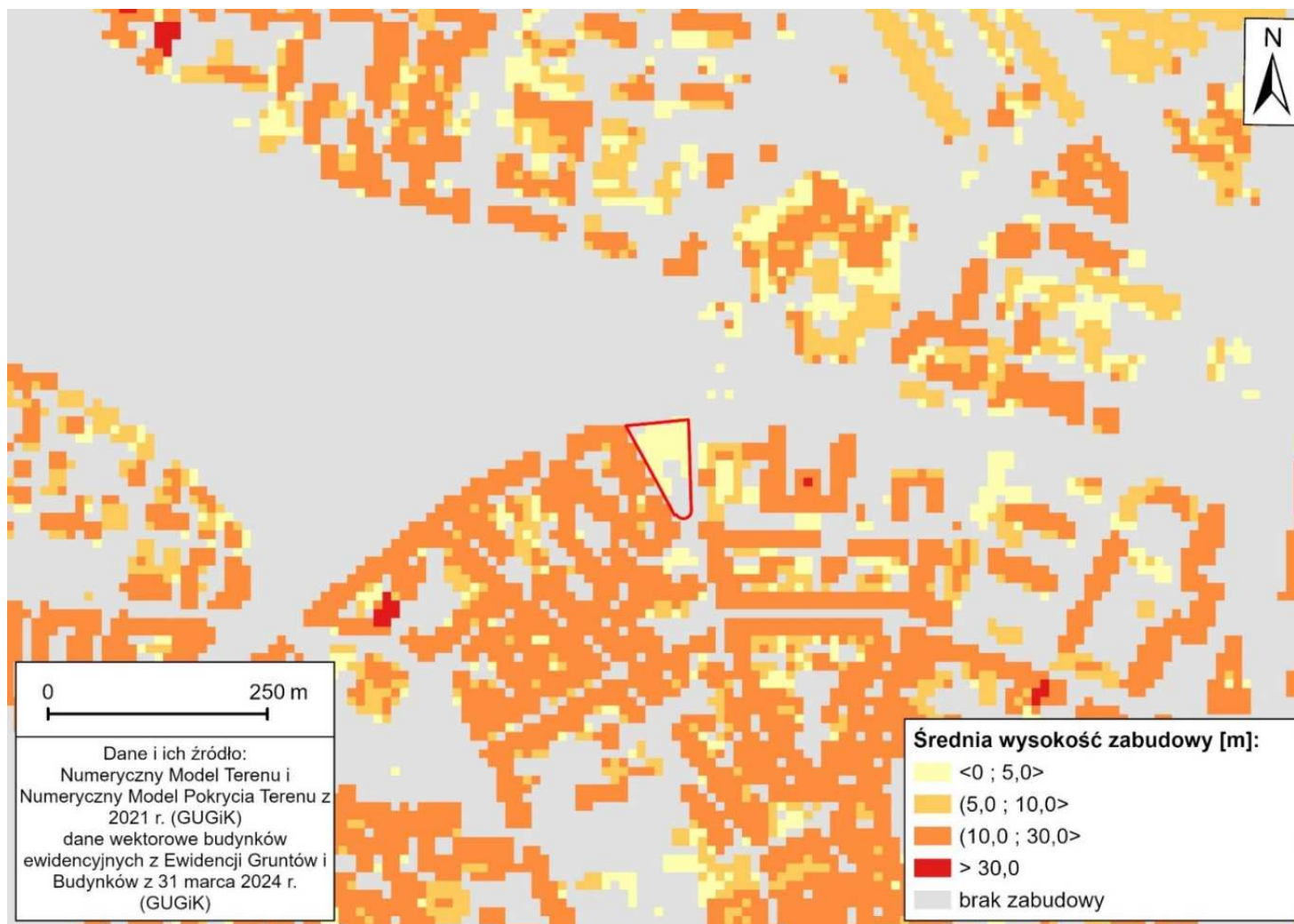
Ryc. 41. Obszar „Nowy Kleparz” na ortofotomapie w skali barwnej RGB (górna część) i CIR (dolna część)



Ryc. 42. Obszar „Nowy Kleparz” na mapie wartości wskaźnika NDVI



Ryc. 43. Obszar „Nowy Kleparz” na mapie średnich wysokości roślinności



Ryc. 44. Obszar „Nowy Kleparz” na mapie średnich wysokości zabudowy

Osiedle Szkolne

Ukształtowanie terenu i wysokość bezwzględna: Średnia wysokość bezwzględna na tym obszarze wynosi 208,04 m n.p.m. Leży on na granicy dwóch mezoregionów: Płaskowyżu Proszowickiego i Niziny Nadwiślańskiej (Solon i in. 2018).

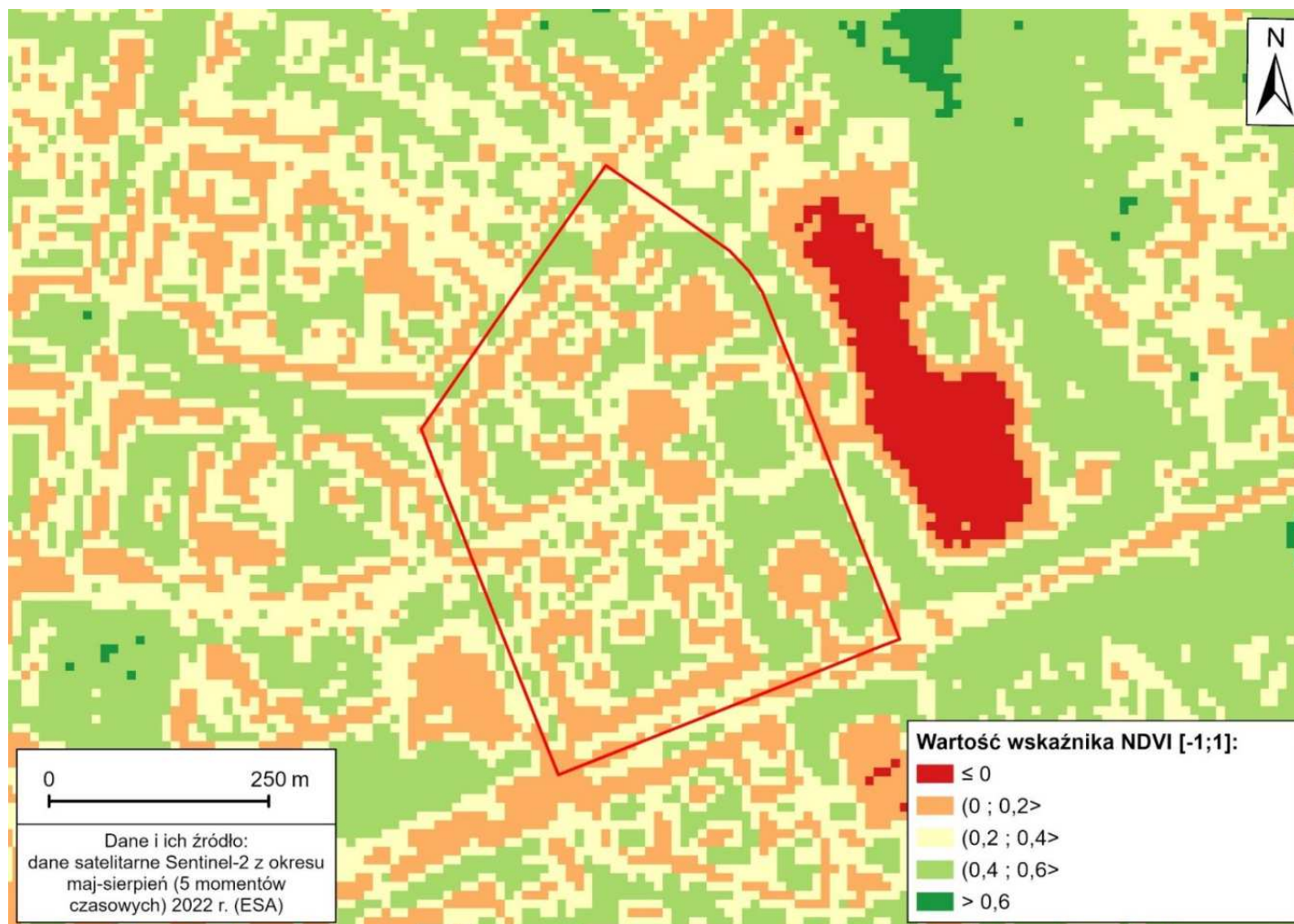
Wskaźnik NDVI i struktura pokrycia terenu: Niskie wartości wskaźnika NDVI (0-0,2) charakterystyczne dla budynków i obszarów antropogenicznych (jezdnie, parkingi, chodniki) występują naprzemiennie z wysokimi wartościami (0,4-0,6). Spowodowane jest to dużą liczbą drzew porastających przestrzenie pomiędzy zabudowaniami i pasy zieleni oddzielającej chodniki od jezdni. Średnia wartość NDVI na tym obszarze wynosi 0,323, ale jest zaniżona przez Zalew Nowohucki (woda zazwyczaj cechuje się ujemnym wskaźnikiem NDVI).

Roślinność: Bardzo duży udział zieleni wysokiej porastającej przestrzenie pomiędzy zabudowaniami. Średnia wysokość roślinności na tym obszarze wynosi 8,09 m.

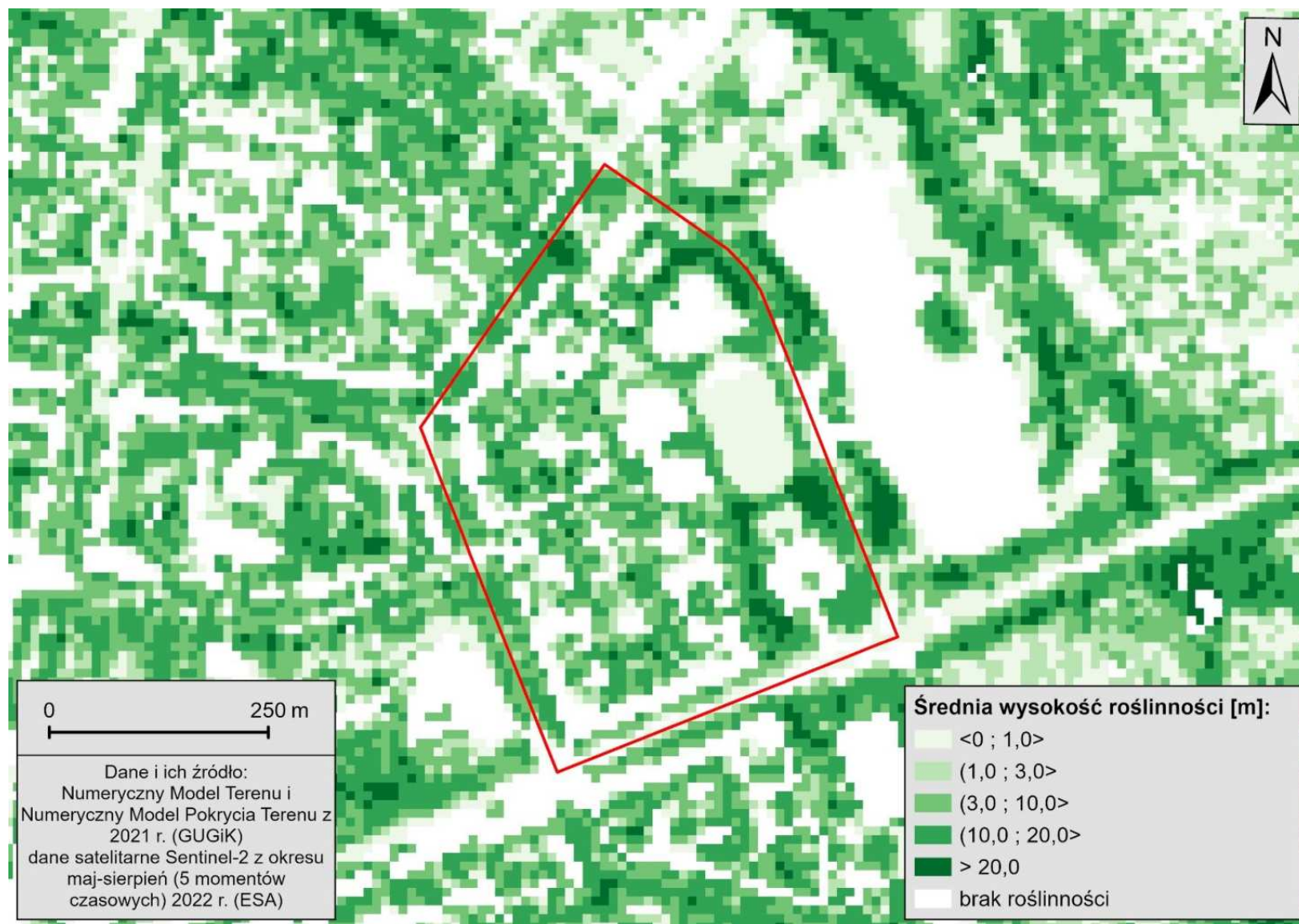
Zabudowa: Zdecydowana większość budynków to bloki mieszkalne o wysokości od 10,0 do 30,0 m. Średnia wysokość zabudowy na tym terenie wynosi 12,60 m (ryc. 45, 46, 47, 48).



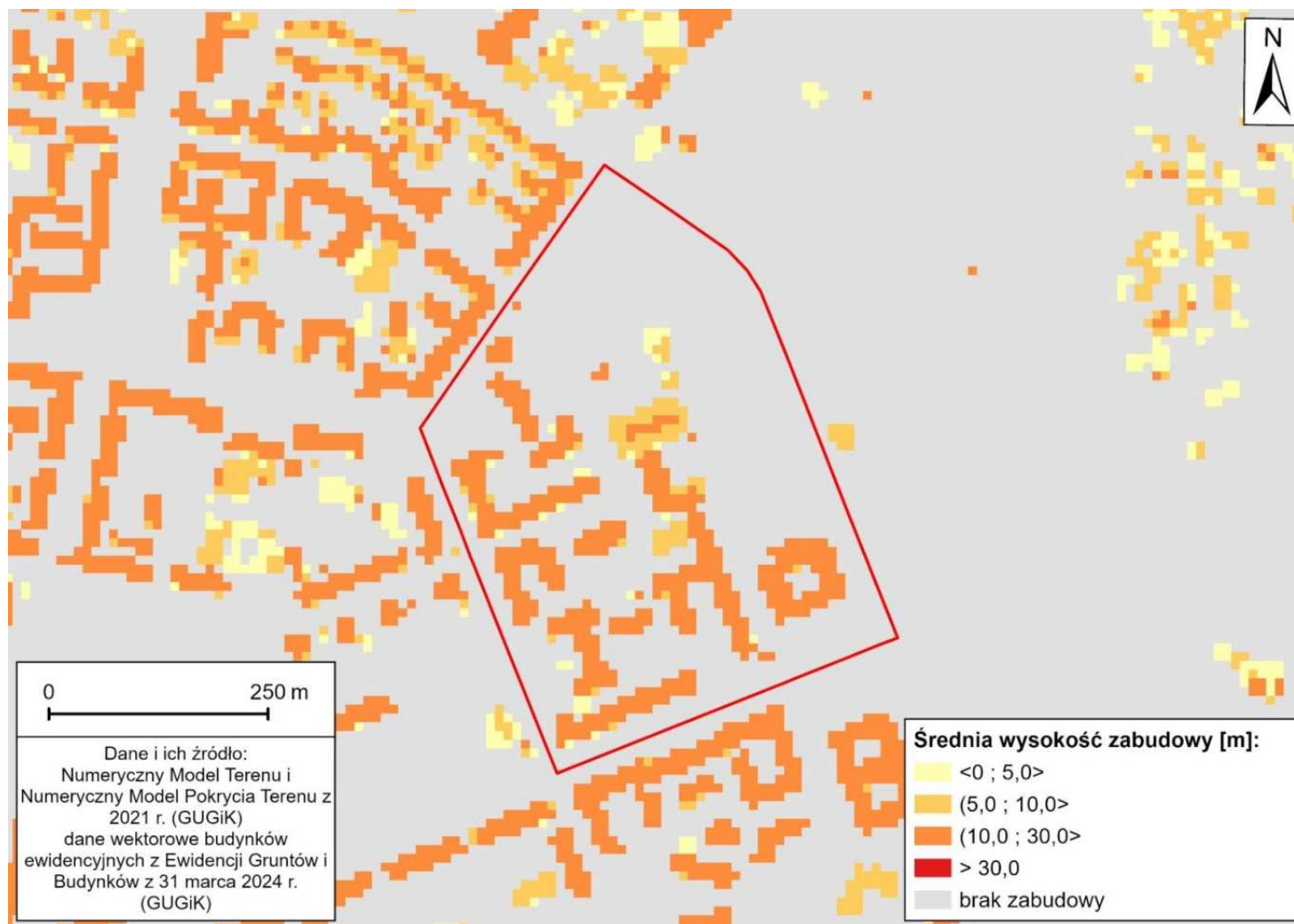
Ryc. 45. Obszar „Osiedle Szkolne” na ortofotomapie w skali barwnej RGB (górna część) i CIR (dolna część)



Ryc. 46. Obszar „Osiedle Szkolne” na mapie wartości wskaźnika NDVI



Ryc. 47. Obszar „Osiedle Szkolne” na mapie średnich wysokości roślinności



Ryc. 48. Obszar „Osiedle Szkolne” na mapie średnich wysokości zabudowy

Osiedle Podwawelskie

Ukształtowanie terenu i wysokość bezwzględna: Obszar leży leżą w dolinie Wisły, na obszarze Niziny Nadwiślańskiej (Solon i in. 2018), na średniej wysokości wynoszącej 204,08 m n.p.m.

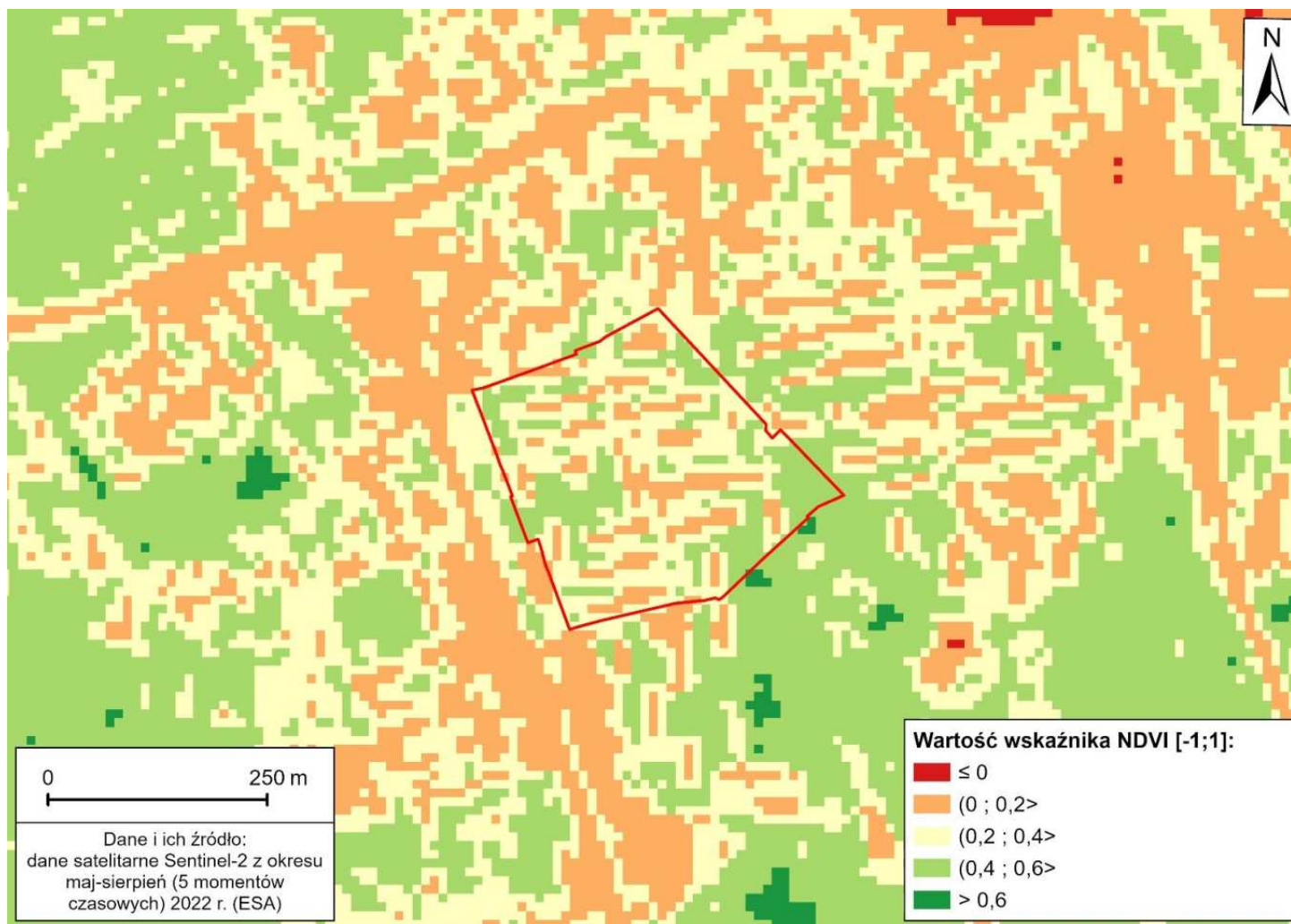
Wskaźnik NDVI i struktura pokrycia terenu: Obszar osiedli mieszkaniowych w głównej mierze przyjmuje wartości wskaźnika NDVI w zakresie od 0 do 0,2, jednak z licznymi obszarami pokrytymi roślinnością. Więcej terenów zielonych znajduje się w południowej części obszaru, gdzie dominuje zabudowa willowa i obszary zielone. Średnia wartość współczynnika NDVI na tym obszarze wynosi 0,301.

Roślinność: Pomiędzy blokami mieszkalnymi znajduje się zarówno zieleń niska (do 1,0 m wysokości), średnia (1,0-3,0 m wysokości), jak i wysoka (3,0-10,0 m, 10,0-20,0 m, a czasami nawet powyżej 20,0 m wysokości), natomiast w południowej części obszaru największy udział powierzchni zielonych to zadrzewienia. Średnia wysokość roślinności na tym terenie wynosi 5,75 m.

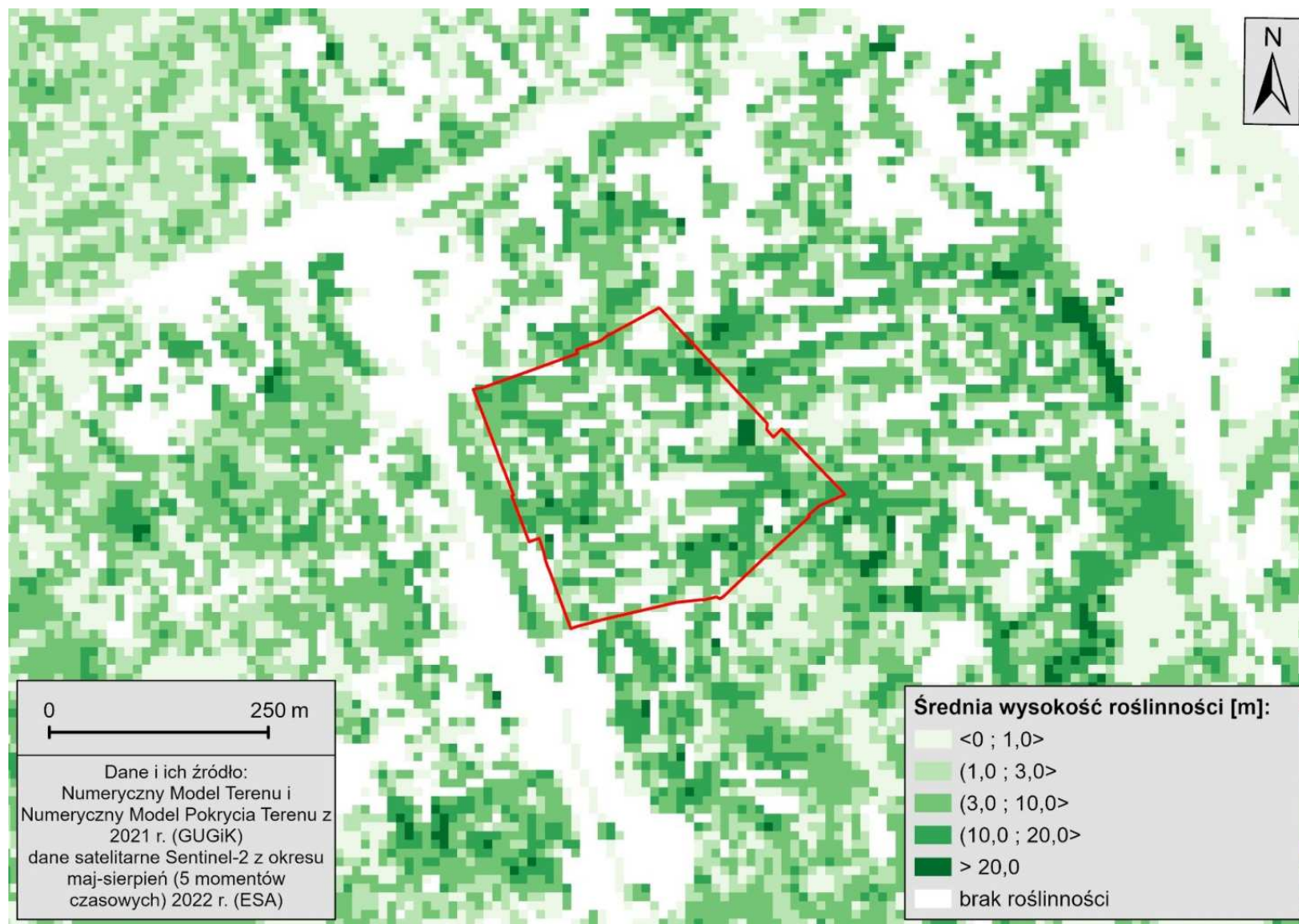
Zabudowa: Większość zabudowy na tym obszarze to bloki mieszkalne, których wysokość zawiera się w przedziale od 10,0 do 30,0 m. Kilka z nich to bloki wielokondygnacyjne, o wysokości przekraczającej 30,0 m. W południowej i zachodniej części obszaru przeważa zabudowa willowa, o wysokościach budynków nie przekraczających 10,0 m. Średnia wysokość zabudowy na tym terenie wynosi 12,14 m (ryc. 49, 50, 51, 52).



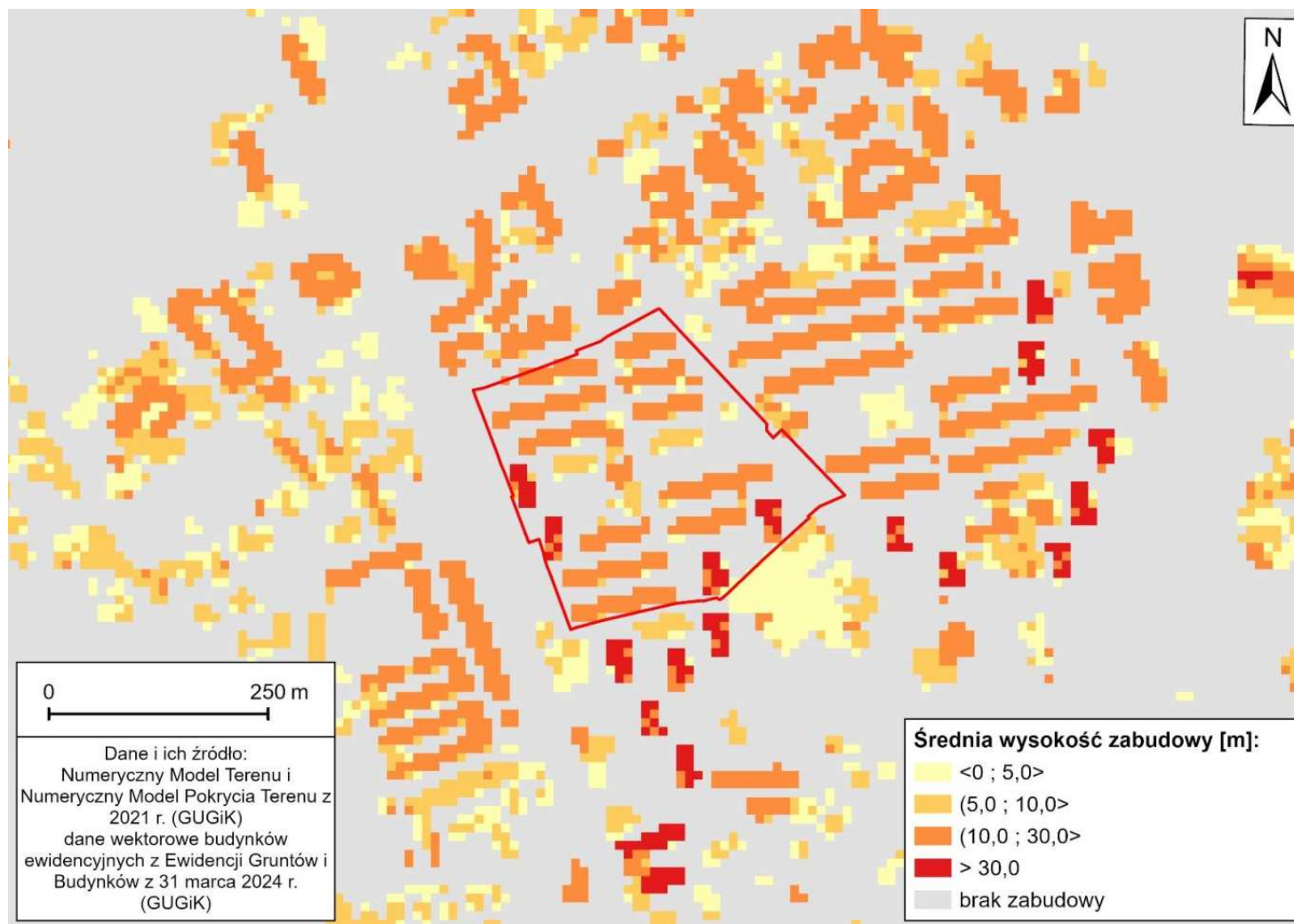
Ryc. 49. Obszar „Osiedle Podwawelskie” na ortofotomapie w skali barwnej RGB (górna część) i CIR (dolna część)



Ryc. 50. Obszar „Osiedle Podwawelskie” na mapie wartości wskaźnika NDVI



Ryc. 51. Obszar „Osiedle Podwawelskie na mapie średnich wysokości roślinności



Ryc. 52. Obszar „Osiedle Podwawelskie” na mapie średnich wysokości zabudowy

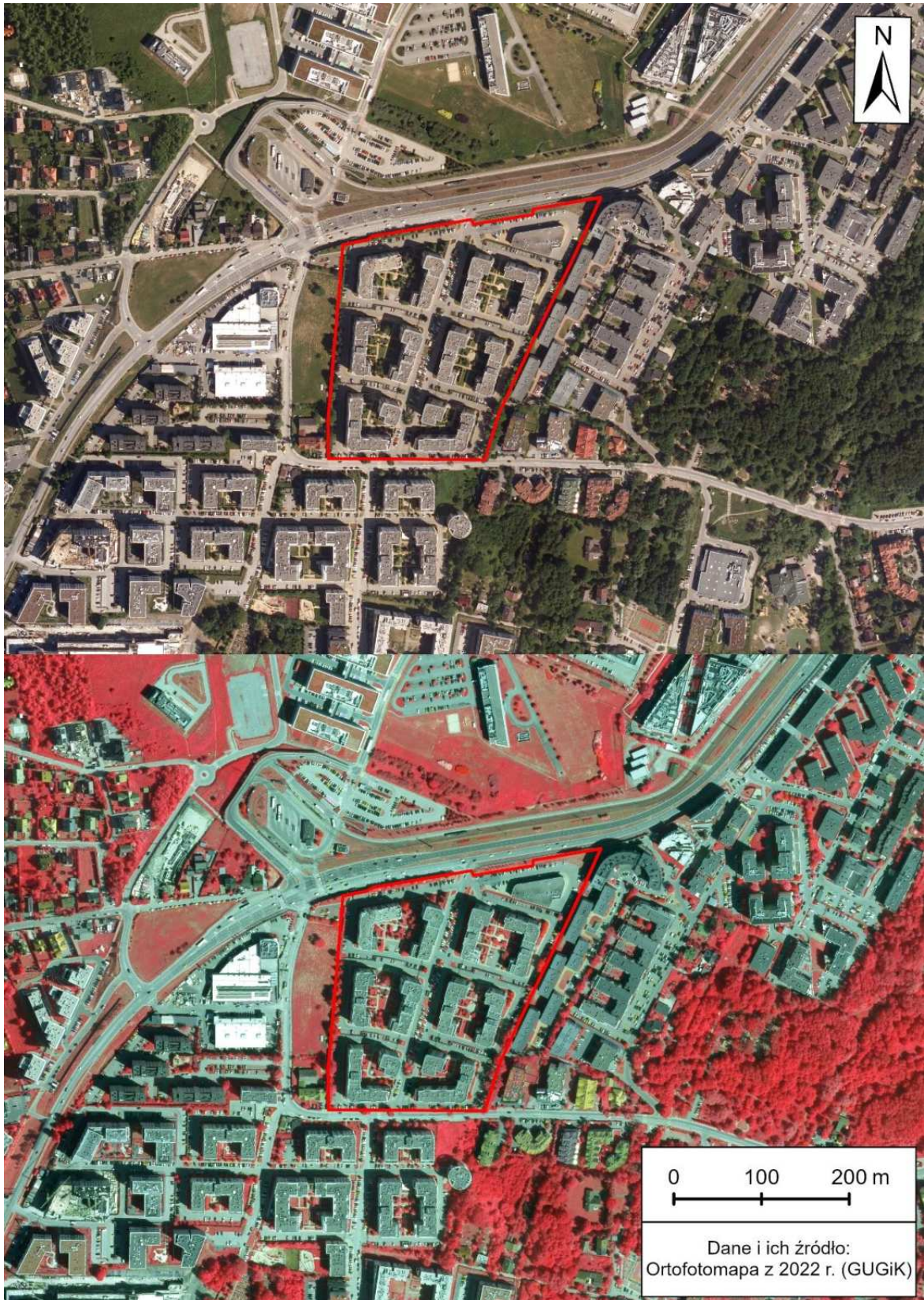
Osiedle Europejskie

Ukształtowanie terenu i wysokość bezwzględna: Obszar leży na granicy Pomostu Krakowskiego i Podgórza Krakowskiego (Solon i in. 2018), a jego średnia wysokość bezwzględna wynosi 234,64 m n.p.m.

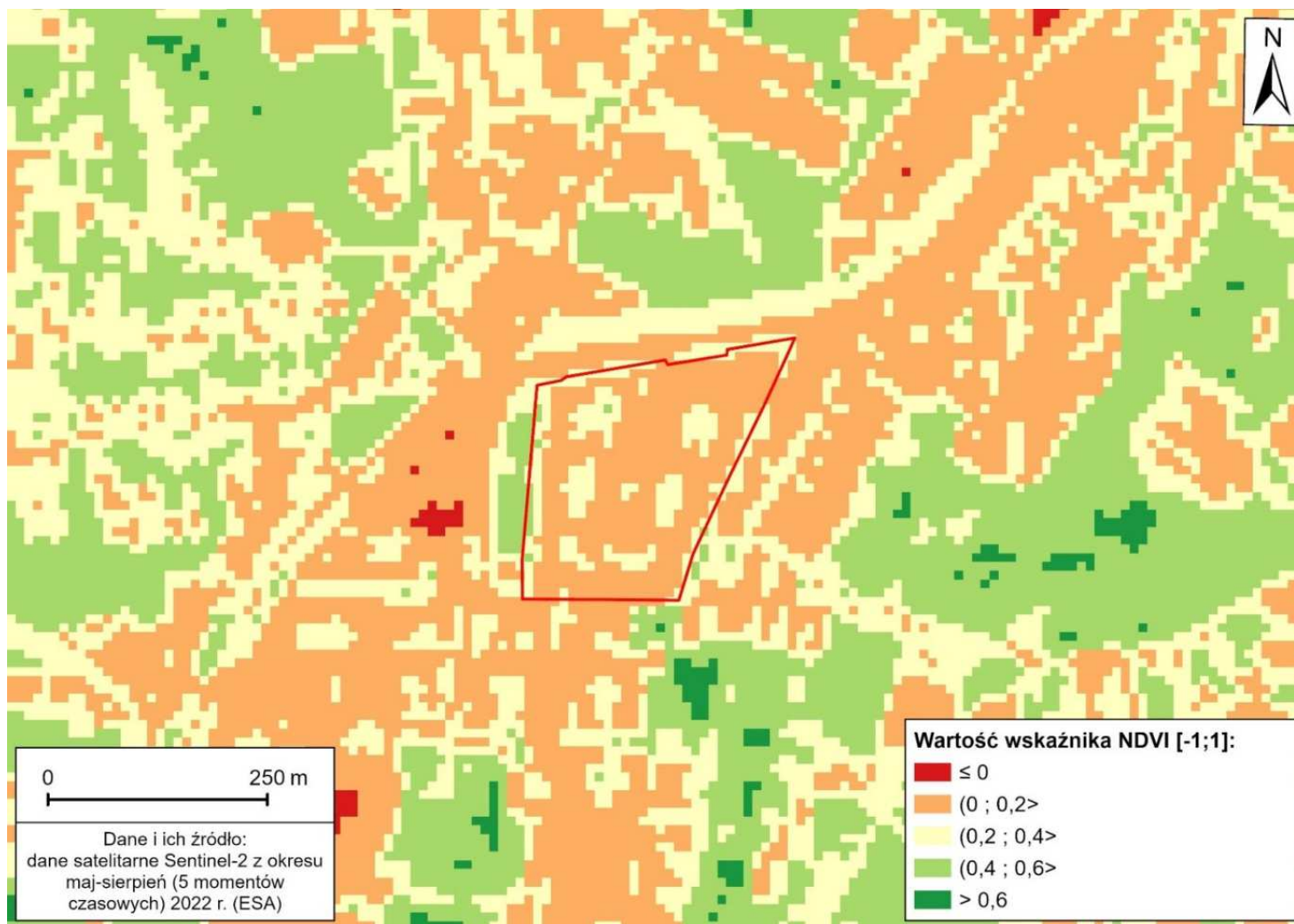
Wskaźnik NDVI i struktura pokrycia terenu: W obszarach osiedli bloków mieszkalnych przeważają obszary o wartościach wskaźnika NDVI w zakresie 0-0,2 (zabudowania) i 0,2-0,4 (trawniki), większa aktywność fotosyntezy widoczna w północno-zachodniej (częściowo zadrzewione łąki i nieużytki) oraz południowo-wschodniej (cmentarz i park) części obszaru (wartości wskaźnika NDVI z zakresu: 0,2-0,4 oraz 0,4-0,6). Średnia wartość wskaźnika NDVI na tym obszarze wynosi 0,242.

Roślinność: Można wyróżnić trzy pasy roślinności, ciągnące się z północnego wschodu na południowy zachód: pierwszy, wysunięty najdalej na północny zachód, to obszary łąk i nieużytków, z przewagą zieleni niskiej (0-1,0 m wysokości), ale częściowo zadrzewione (wysokości roślinności z zakresu: 1,0-3,0 m oraz 3,0-10,0 m). Drugi pas, środkowy, to obszary osiedli bloków mieszkalnych, niewielka ilość terenów zielonych, pojedyncze drzewa lub niewielkie trawniki o małej aktywności fotosyntezy. Ostatni, wysunięty najdalej na południowy wschód pas, to obszar parku, zadrzewionych nieużytków i cmentarza. Duży udział zieleni wysokiej o wysokości od 3,0 do 20,0 m. Średnia wysokość zieleni na tym obszarze to 3,46 m.

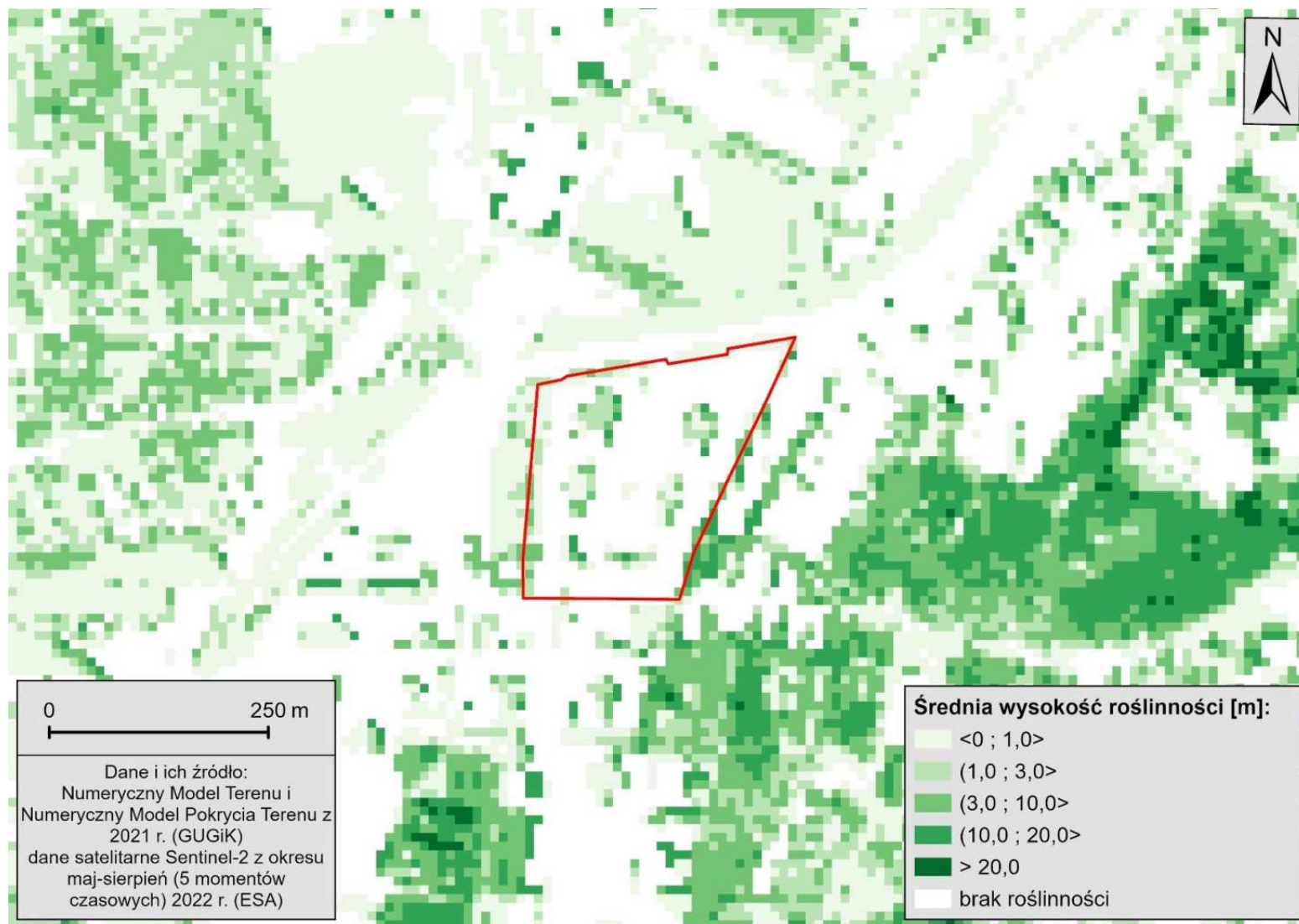
Zabudowa: Przeważa zabudowa w postaci bloków mieszkalnych, o wysokościach z zakresu od 10,0 do 30,0 m. Na północnym-zachodzie zabudowa willowa, nie przekraczająca wysokości 10,0 m. Średnia wartość wysokości zabudowy na tym obszarze wynosi 14,57 m (ryc. 53, 54, 55, 56).



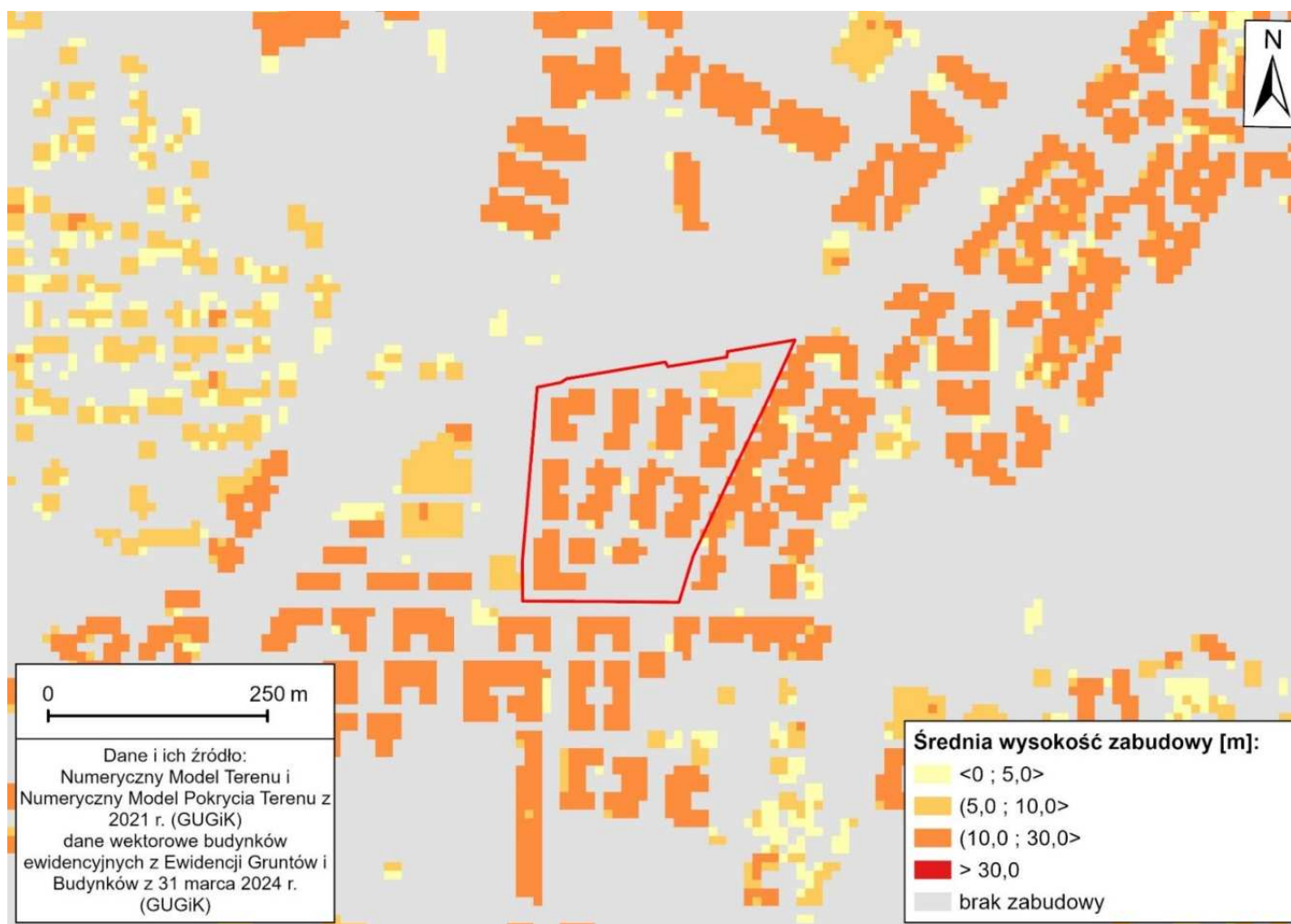
Ryc. 53. Obszar „Osiedle Europejskie” na ortofotomapie w skali barwnej RGB (górna część) i CIR (dolna część)



Ryc. 54. Obszar „Osiedle Europejskie” na mapie wartości wskaźnika NDVI



Ryc. 55. Obszar „Osiedle Europejskie” na mapie średnich wysokości roślinności



Ryc. 56. Obszar „Osiedle Europejskie” na mapie średnich wysokości zabudowy

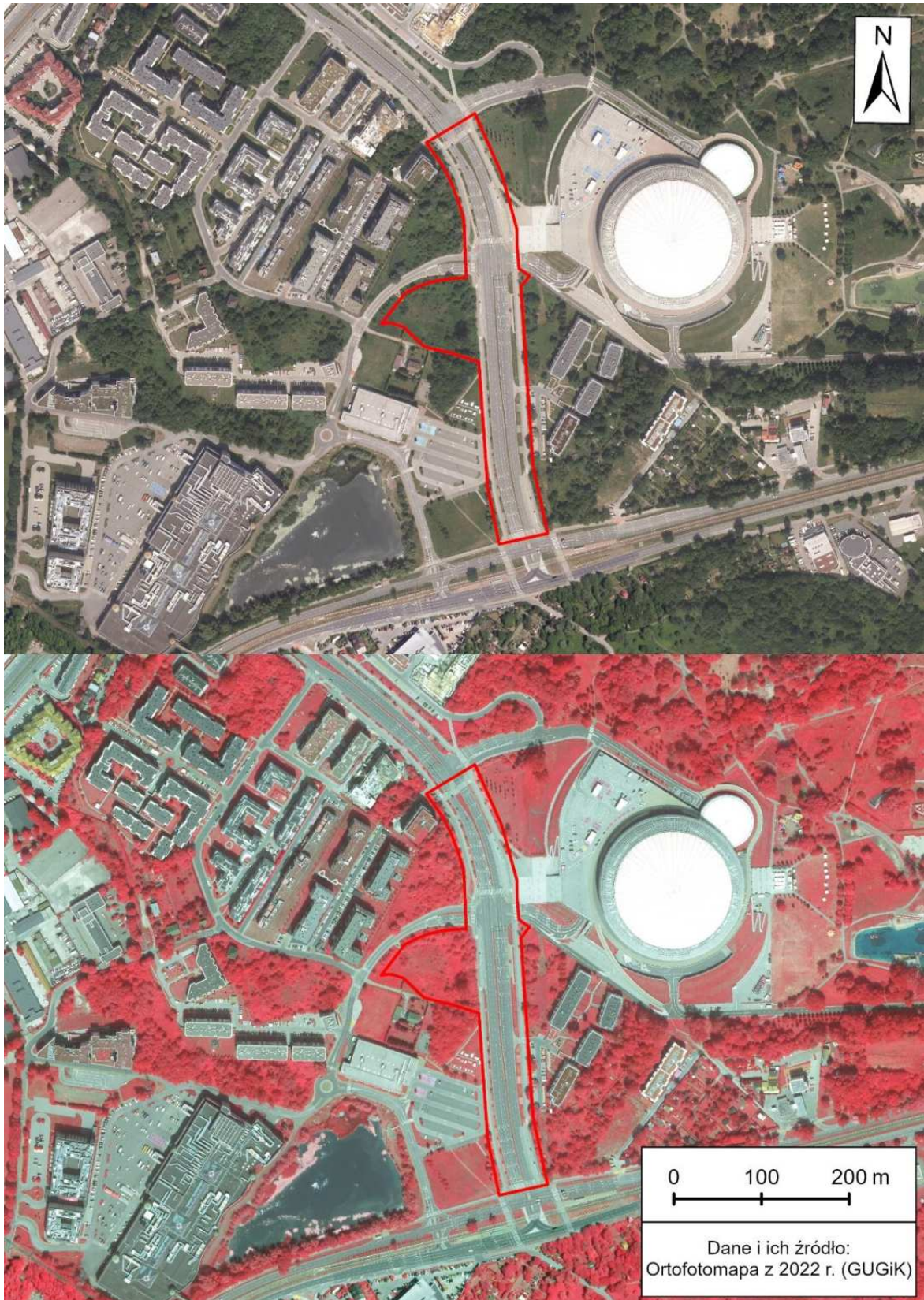
Ulica Stanisława Lema

Ukształtowanie terenu i wysokość bezwzględna: Wybrany odcinek ul. Stanisława Lema leży na obszarze Niziny Nadwiślańskiej (Solon i in. 2018), w dolinie Wisły. Średnia wysokość bezwzględna na tym terenie wynosi 201,61 m n.p.m.

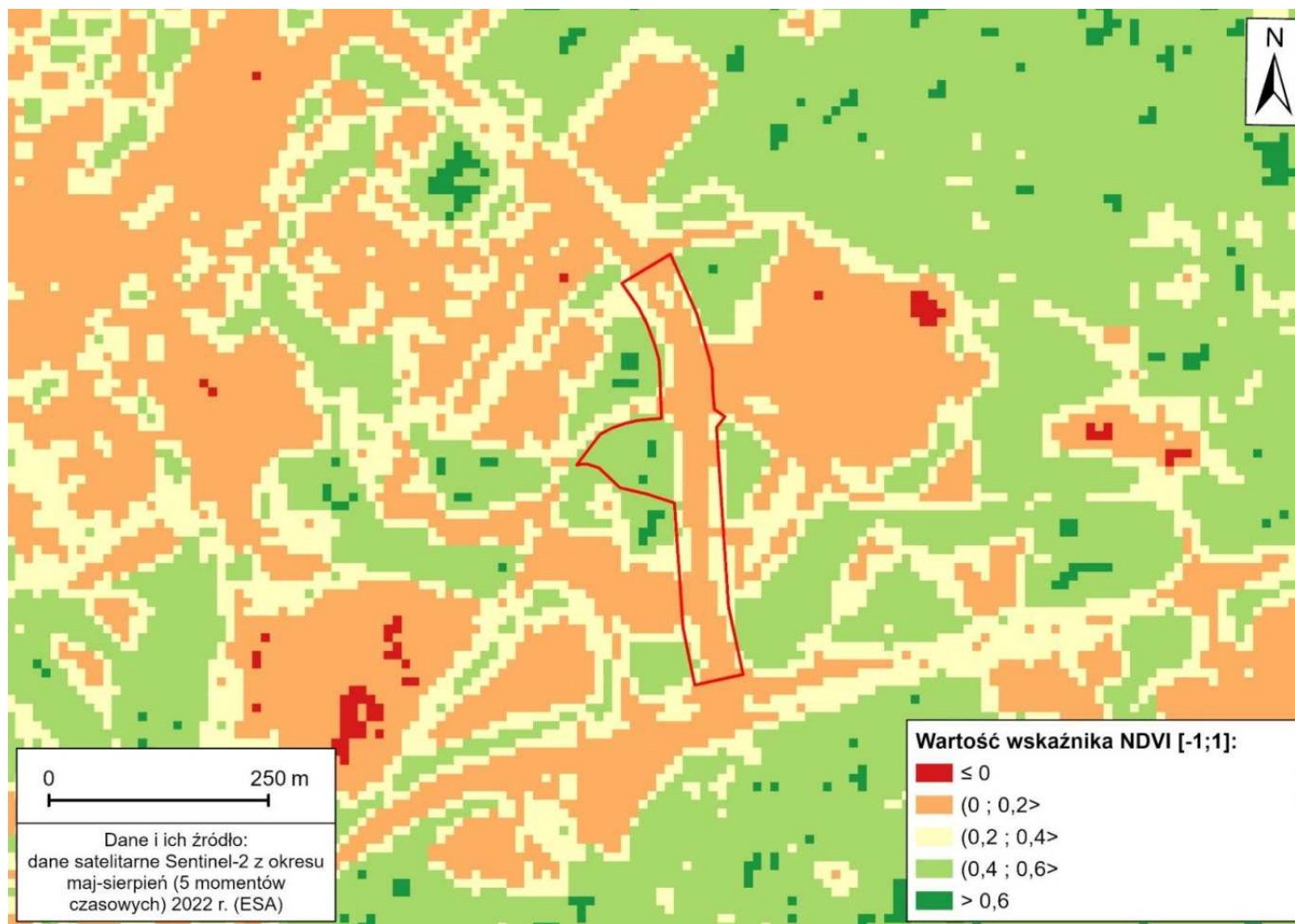
Wskaźnik NDVI i struktura pokrycia terenu: Obszary antropogeniczne o niskich wartościach wskaźnika NDVI występują naprzemiennie z obszarami o wysokim poziomie fotosyntezy (głównie w zakresie 0,4-0,6), w tym również trawniki, co świadczy o wysokiej bioróżnorodności i kondycji roślin. Staw Dąbski, mimo że jest to stojąca woda, nie przyjmuje wartości ujemnych wskaźnika NDVI, lecz z zakresu 0-0,2. Może to być spowodowane zarastaniem zbiornika przez roślinność lub zielonkawym zabarwieniem wody. Średnia wartość NDVI dla tego obszaru wynosi 0,322.

Roślinność: Występują licznie obszary porośnięte drzewami (o wysokości ponad 3 m), ale również obszary porośnięte zielenią niską (do 1 m wysokości). Średnia wysokość roślinności na tym terenie wynosi 4,07 m.

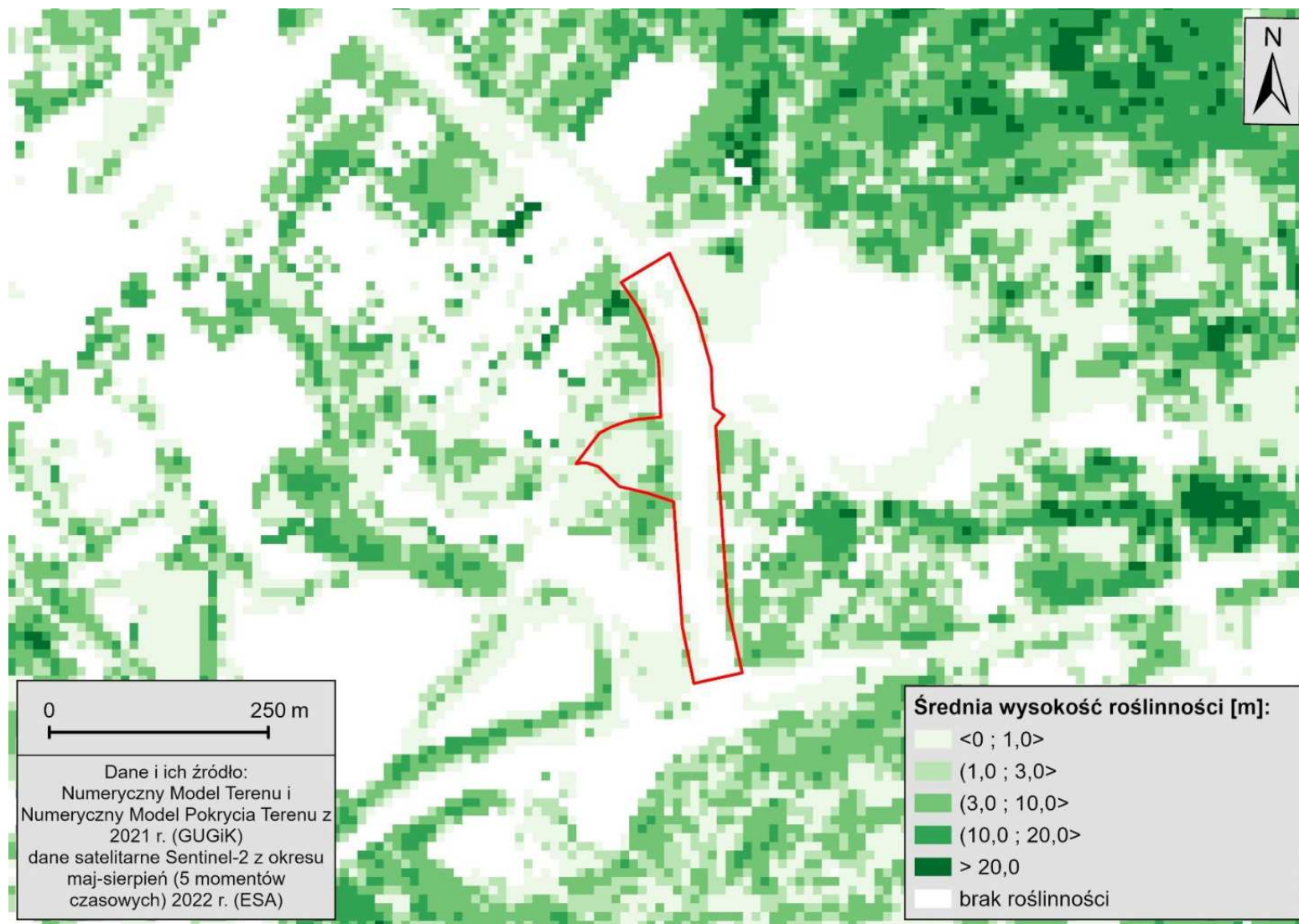
Zabudowa: Zabudowa wysoka – głównie bloki mieszkalne oraz budynki wojewódzkiej komendy policji, Tauron Arena i budynek byłej Galerii Plaza. Większość zabudowy ma wysokość od 10,0 do 30,0 m, choć występuje również niska zabudowa, do 5 m wysokości. Średnia wysokość zabudowy wynosi 13,94 m (ryc. 57, 58, 59, 60).



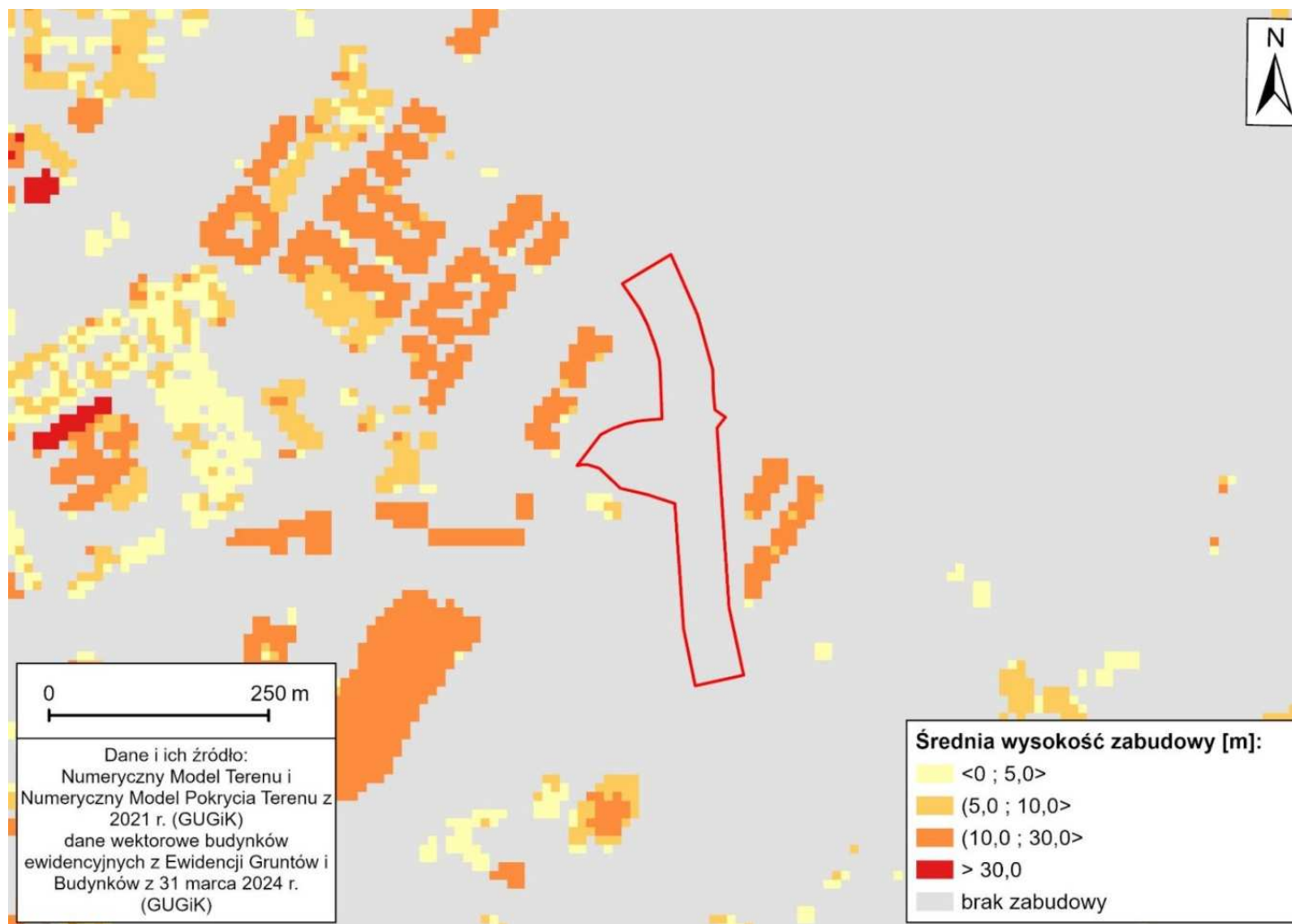
Ryc. 57. Obszar „Ulica S. Lema” na ortofotomapie w skali barwnej RGB (górna część) i CIR (dolna część)



Ryc. 58. Obszar „Ulica S. Lema” na mapie wartości wskaźnika NDVI



Ryc. 59. Obszar „Ulica S. Lema” na mapie średnich wysokości roślinności



Ryc. 60. Obszar „Ulica S. Lema” na mapie średnich wysokości zabudowy

Ulica Wielicka

Ukształtowanie terenu i wysokość bezwzględna: Wybrany odcinek ul. Wielickiej leży w Kotlinie Sandomierskiej (Solon i in. 2018), ale na jej wyższym poziomie. Średnia wysokość bezwzględna na tym obszarze to 228,65 m n.p.m.

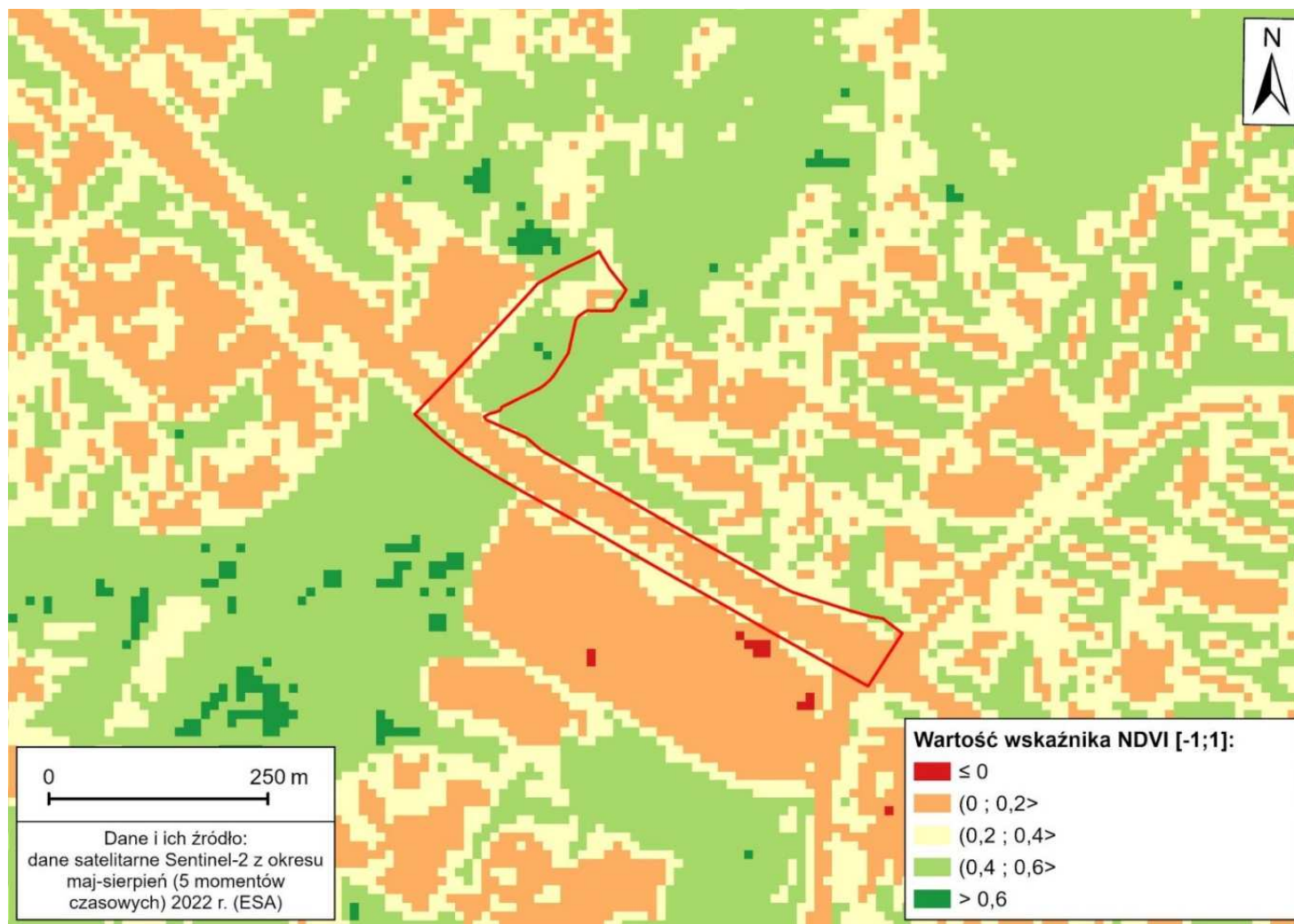
Wskaźnik NDVI i struktura pokrycia terenu: Na wybranym odcinku ul. Wielickiej znajdują się osiedla mieszalne, zabudowania szpitala, dwa budynki wielkopowierzchniowy o przeznaczeniu handlowo-usługowym wraz z parkingiem oraz budynki uniwersyteckie. Z drugiej strony jest to również obszar, na którym znajdują się liczne parki: Park Rieczny Drwinki, Park im. Anny i Erazma Jerzmanowskich i Park Lilli Wenedy. Parki są wyraźnie widoczne na mapie wartości wskaźnika NDVI to trzy duże obszary o wysokich wartościach rzeczonoego wskaźnika (0,4-0,6). Mniejsze obszary o nieco mniejszych lub takich samych wartościach wskaźnika NDVI (0,2-0,4 i 0,4-0,6), to trawniki i zadrzewienia pomiędzy zabudowaniami. Średnia wartość wskaźnika NDVI dla tego obszaru wynosi 0,321.

Roślinność: Z uwagi na występowanie na tym terenie trzech parków, dominuje roślinność wysoka (powyżej 3,0 m wysokości), lecz widoczne jest także występowanie roślinności niskiej (poniżej 1,0 m wysokości) oraz średniej (1,0-3,0 m wysokości). Średnia wysokość roślinności na tym obszarze wynosi 6,80 m.

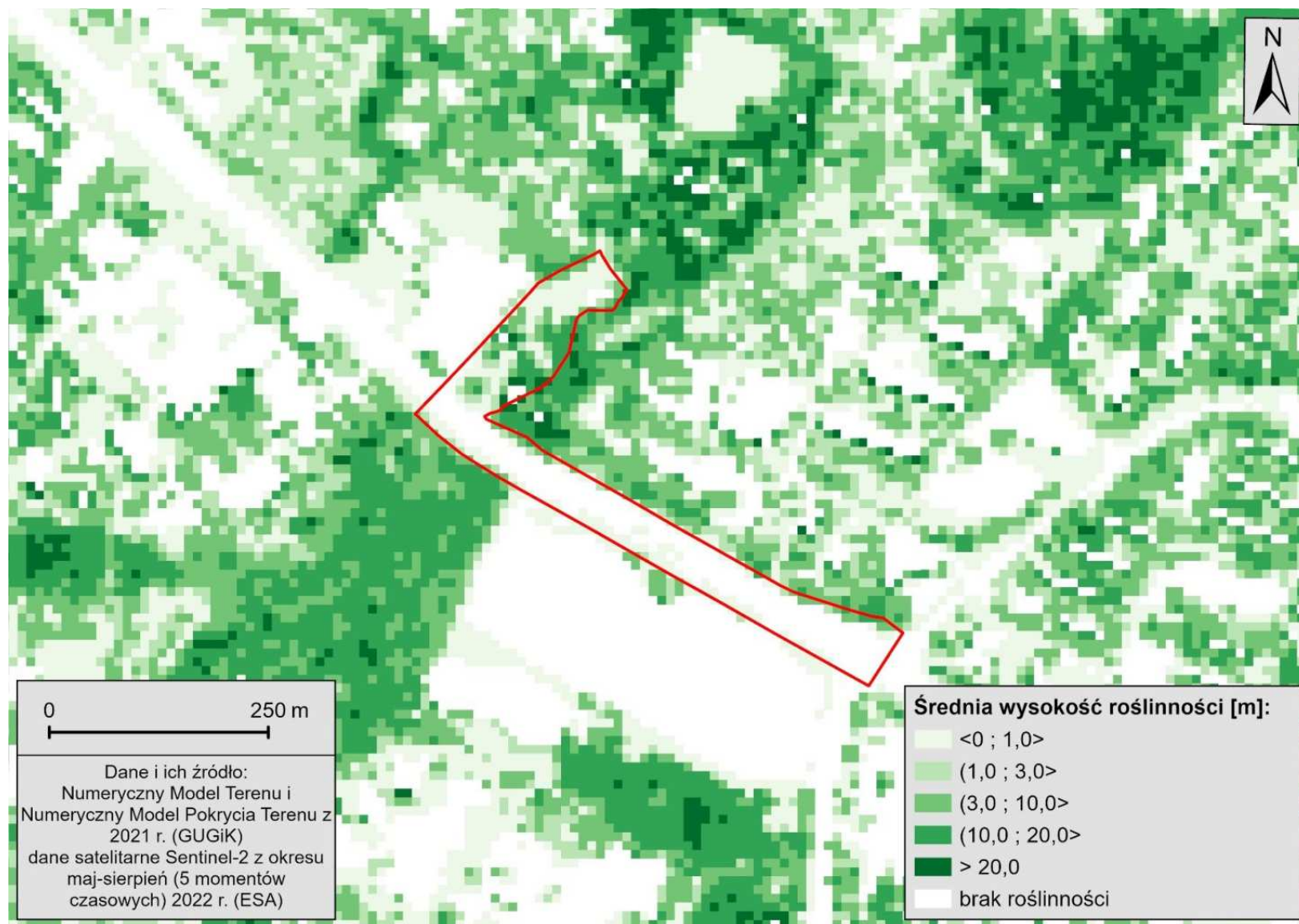
Zabudowa: Dominuje zabudowa wysoka i bardzo wysoka (10,0-30,0 m i ponad 30 m wysokości), lecz występuje również zabudowa willowa (do 5,0 m wysokości, rzadziej 5,0-10,0 m wysokości). Średnia wysokość zabudowy na tym obszarze wynosi 11,90 m (ryc. 60, 61, 62, 63).



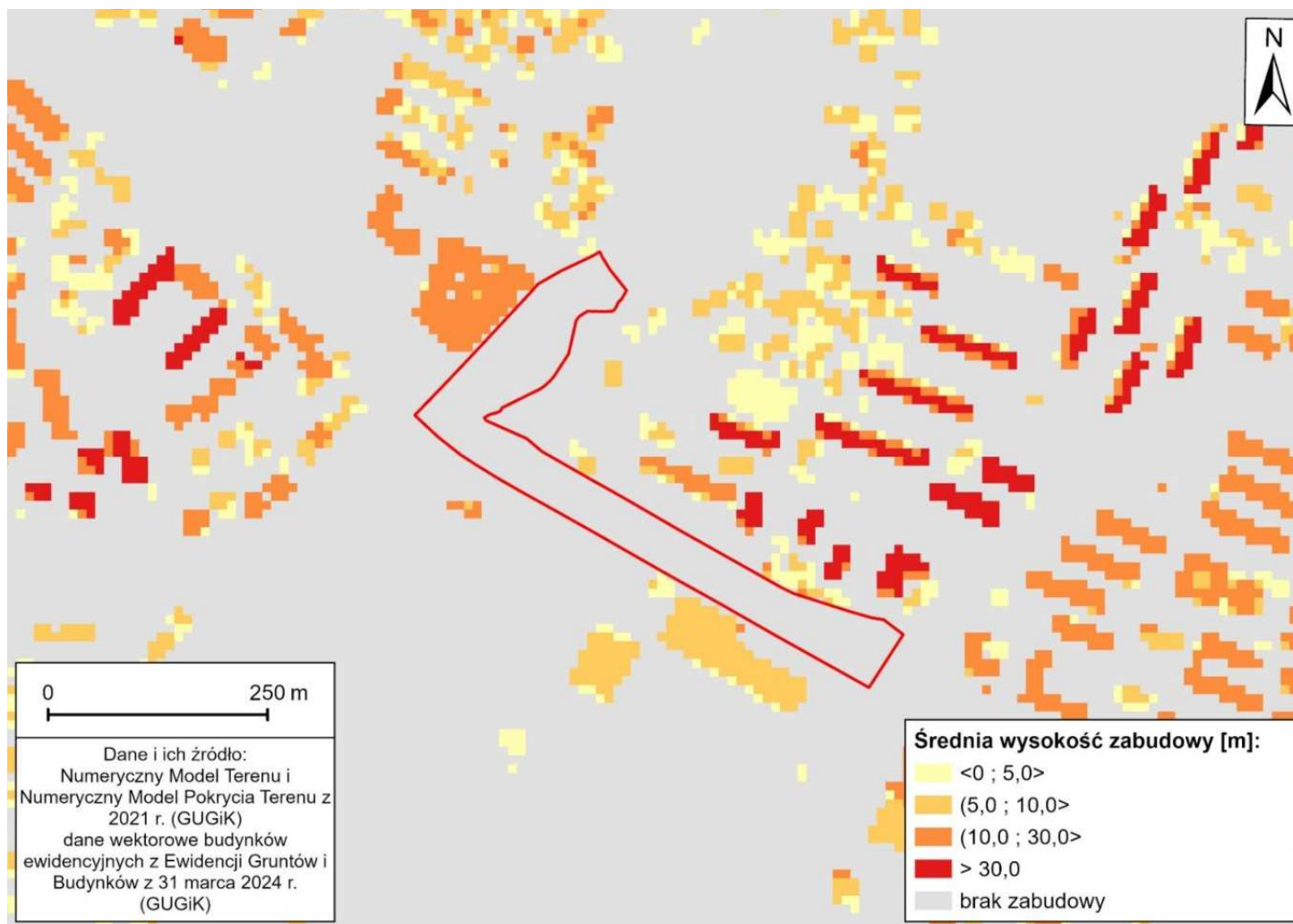
Ryc. 60. Obszar „Ulica Wielicka” na ortofotomapie w skali barwnej RGB (górna część) i CIR (dolna część)



Ryc. 61. Obszar „Ulica Wielicka” na mapie wartości wskaźnika NDVI



Ryc. 62. Obszar „Ulica Wielicka” na mapie średnich wysokości roślinności



Ryc. 63. Obszar „Ulica Wielicka” na mapie średnich wysokości zabudowy

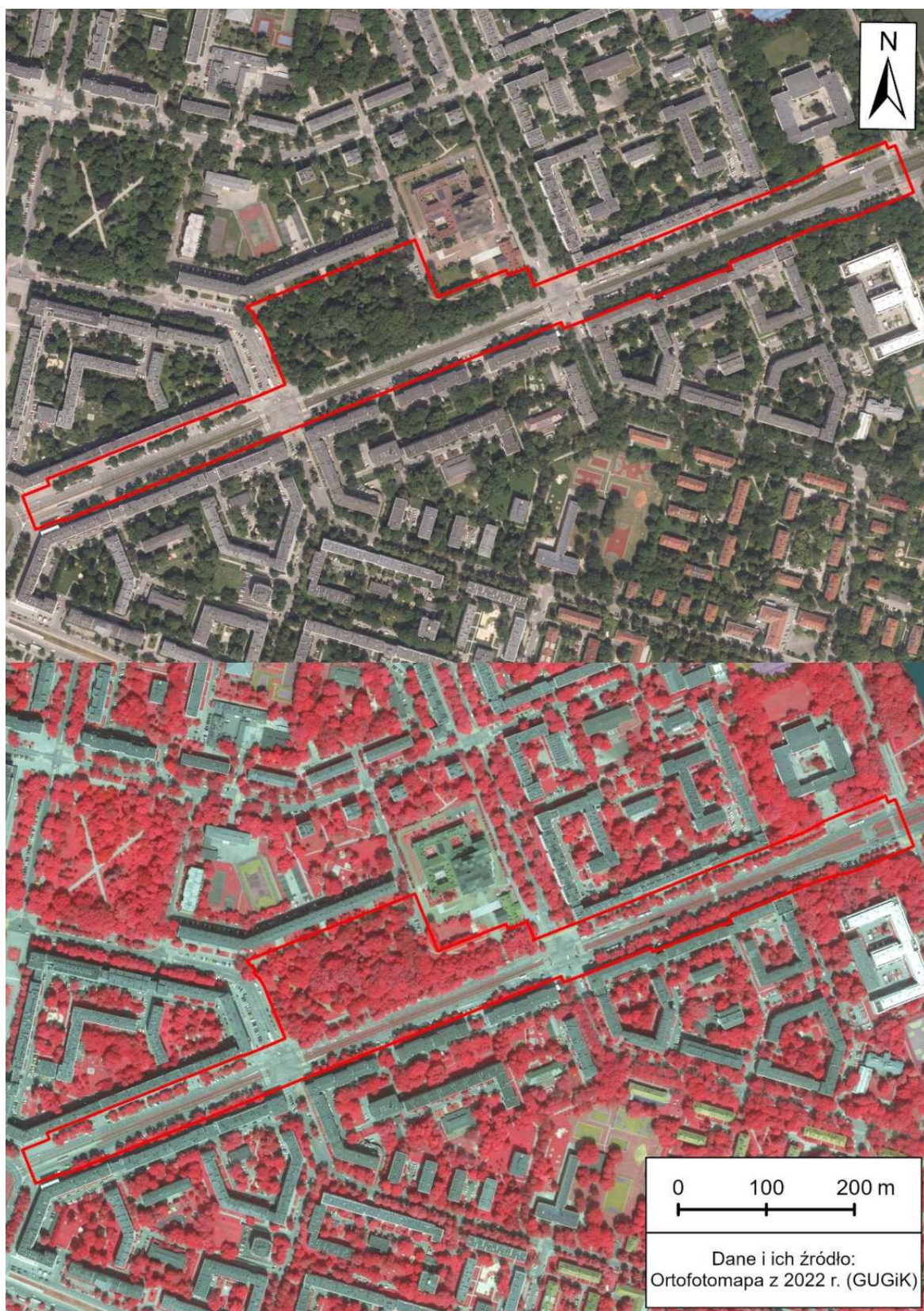
Aleja Solidarności

Ukształtowanie terenu i wysokość bezwzględna: Średnia wysokość bezwzględna na tym obszarze wynosi 208,95 m n.p.m. Leży on na granicy dwóch mezoregionów: Płaskowyżu Proszowickiego i Niziny Nadwiślańskiej (Solon i in. 2018).

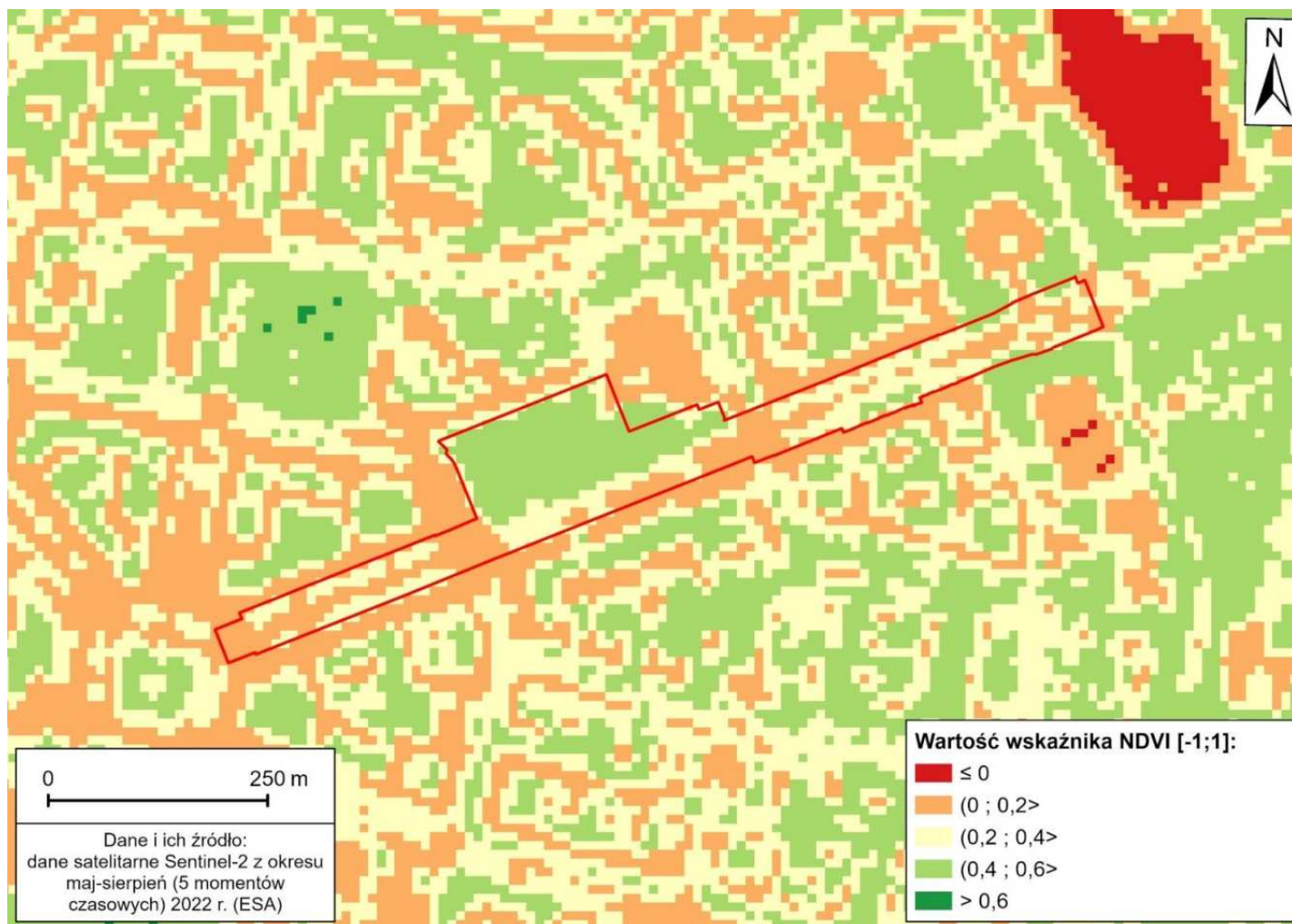
Wskaźnik NDVI i struktura pokrycia terenu: Średnia wartość NDVI na tym obszarze wynosi 0,297. Jest zaniżona przez Zalew Nowohucki (woda zazwyczaj cechuje się ujemnym wskaźnikiem NDVI). Obszary zieleni pomiędzy budynkami są bardzo dobrze widoczne na mapie wartości NDVI dla tego obszaru, bowiem budynki cechuje niska wartość NDVI (0-0,2), zaś zieleń wysoką – większe wartości (0,4-0,6).

Roślinność: Duży udział zieleni wysokiej (o wysokości w przedziale 3-10 m oraz 10-20 m). Średnia wysokość roślinności na tym obszarze wynosi 7,46 m.

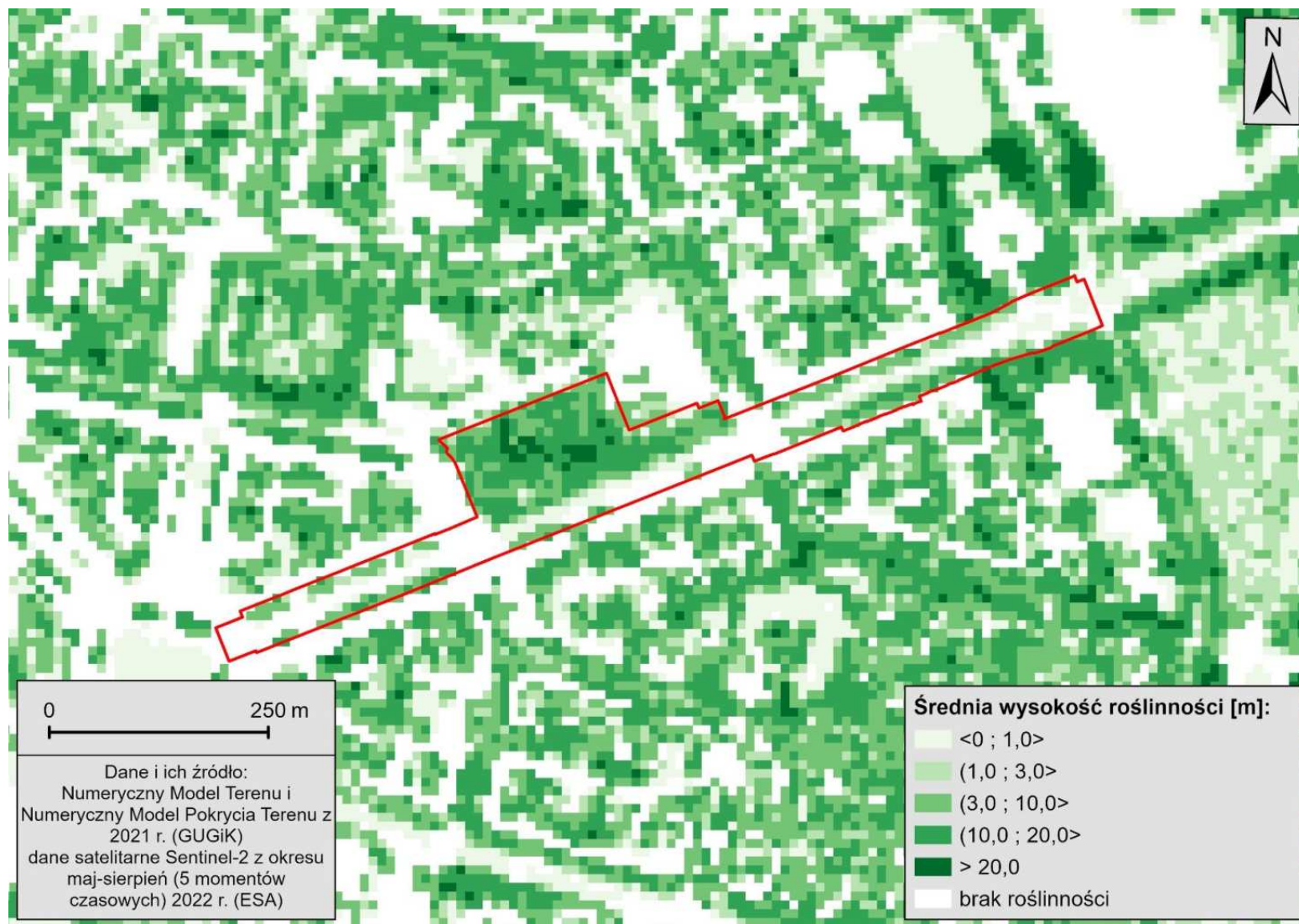
Zabudowa: Sąsiedztwo Alei Solidarności to osiedla bloków mieszkalnych (o wysokości w przedziale 10-30 m). Średnia wysokość zabudowy na tym obszarze to 15,72 m (ryc. 64, 65, 66, 67).



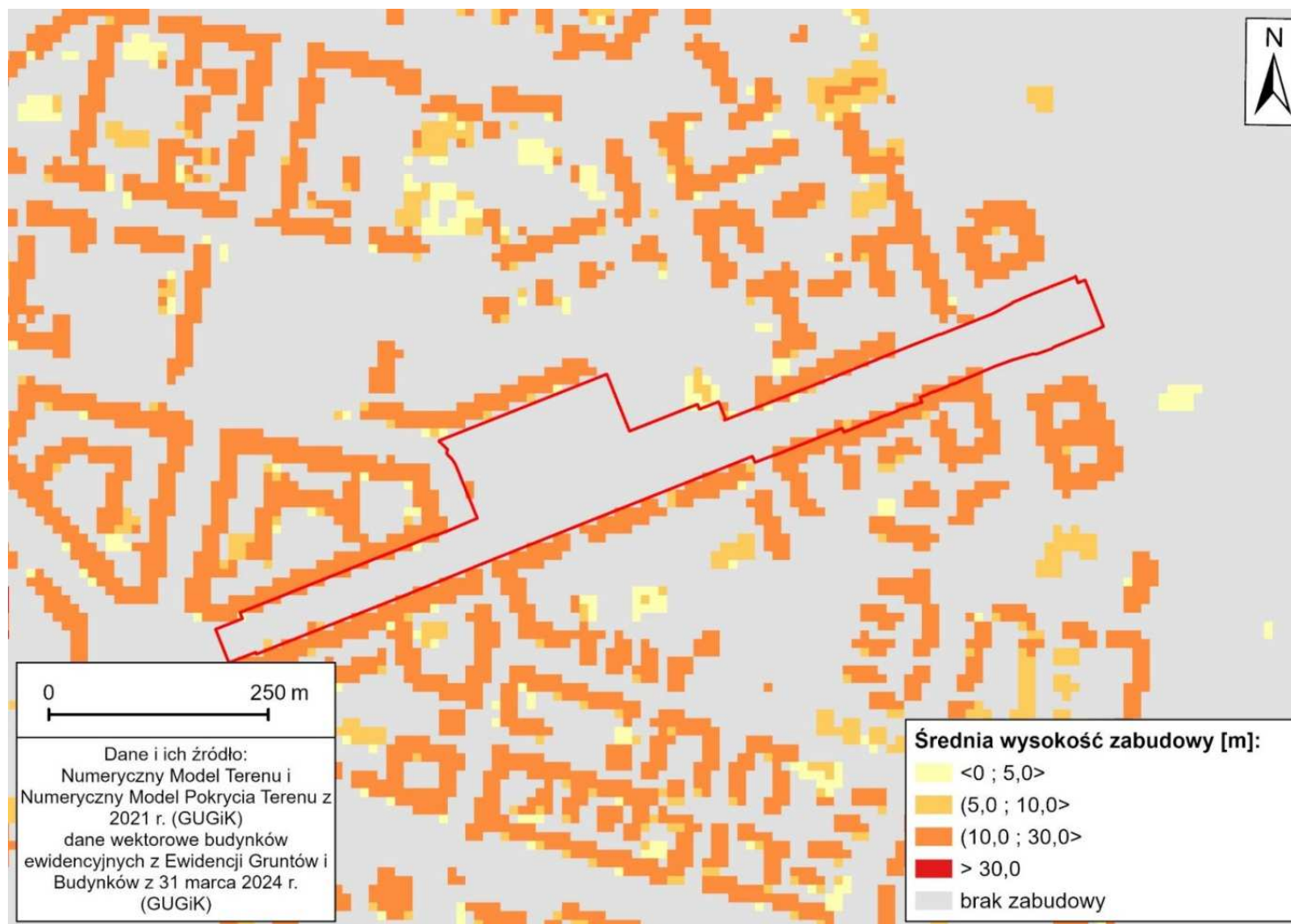
Ryc. 64. Obszar „Aleja Solidarności” na ortofotomapie w skali barwnej RGB (górna część) i CIR (dolna część)



Ryc. 65. Obszar „Aleja Solidarności” na mapie wartości wskaźnika NDVI



Ryc. 66. Obszar „Aleja Solidarności” na mapie średnich wysokości roślinności



Ryc. 67. Obszar „Aleja Solidarności” na mapie średnich wysokości zabudowy

5.3. Zagospodarowanie terenu wybranych lokalizacji z punktu widzenia możliwości realizacji zielonej infrastruktury

Parkingi otwarte

Parkingi przy Centrum Handlowym Zakopianka

Parkingi zlokalizowane są na terenie centrum handlowego położonego w południowej części miasta na terenie Dzielnicy IX Krakowa, w której znajdują się dawne przedmieścia Łagiewniki i Borek Fałęcki (ryc. 68, 69, 70).



Ryc. 68. Rondo w południowej części obszaru parkingów przy CH Zakopianka z maszyną pokazującą przemysłową przeszłość terenu, widok na Sanktuarium Jana Pawła II.
Fot. T. Jaróg.

Jest to obszar częściowo zrekultywowany po dawnych Krakowskich Zakładach Sodowych Solvay, które powstały w początku XX wieku i zostały zamknięte, a następnie wyburzone ze względu na szkodliwość dla środowiska w latach 1989–1996. Parkingi obsługują duże centrum handlowo-usługowe, na które składa się szereg wielkopowierzchniowych obiektów (m.in. hipermarkety Carrefour, Castorama, Decathlon i Multiplex Cinema City). Teren od zachodu ogranicza ul. Zakopiańska i przy niej znajduje się jeden z nielicznych zachowanych budynków po Zakładach Solvay - modernistyczny dawny dom kultury, który obecnie jest siedzibą Centrum Sztuki Współczesnej Solvay.



Ryc. 69. Parkingi przy CH Zakopianka, widok na Centrum Sztuki Współczesnej Solvay.
Fot. T. Jaróg.

W bezpośrednim sąsiedztwie, od wschodu znajduje się klasztor i Sanktuarium Miłosierdzia Bożego, a od południa linia kolejowa i obszary dawnych osadników (dziś Sanktuarium Jana Pawła II oraz planowany park "Białe Morza"). Są to obiekty, które dominują w panoramach i są widoczne z parkingów, ewentualne nasadzenia nie zaburzają tych relacji widokowych.



Ryc. 70. Parkingi przy CH Zakopianka, w tle widok na wieżę Sanktuarium Miłosierdzia Bożego w Krakowie - Łagiewnikach.
Fot. T. Jaróg.

Obszar o niskich walorach kulturowych pozwalający na duży zakres swobody w kształtowaniu zieleni. Teren jest w przeważającej części wybrukowany, z niewielkimi rabatami oraz karłowatymi odmianami drzew o kulistych koronach, zieleni wysokiej niemal brak. Na analizowanym obszarze nie było żadnych komponowanych terenów zieleni. Park Solvay założony pod patronatem zakładów w latach 20. XX wieku znajduje się poza obszarem opracowania, po zachodniej stronie ulicy Zakopiańskiej, za kolonią domów mieszkalnych dla pracowników fabryki. Dopuszczalne znaczne przekształcenie kompozycji w zakresie podstawy oraz ścian wnętrza.

Parkingi przy IKEA Kraków

Parkingi te zlokalizowane są w bezpośrednim sąsiedztwie sklepu meblowego sieci IKEA otwartego w sierpniu 1998 roku przy ul. Josepha Conrada 66 w pobliżu Ronda Ofiar Katynia i trasy wylotowej z Krakowa w kierunku Olkusza.

Na przestrzeni lat w tej okolicy przybyło obiektów handlowych i usługowych. Obszar niemal w całości wybrukowany, z niewielkimi rabatami z krzewów okrywowych. Teren nie posiada walorów kulturowych, a jego zagospodarowanie pozwala na wiele swobody w kształtowaniu zielonej infrastruktury. Dopuszczalne znaczne przekształcenie kompozycji w zakresie podstawy oraz ścian wnętrza (ryc. 71, 72).



Ryc. 71. Parkingi przy CH IKEA.

Fot. T. Jaróg.



Ryc. 72. Parkingi przy CH IKEA.

Fot. T. Jaróg

Parkingi przy centrum handlowym Serenada

Parkingi obsługujące centrum handlowe Serenada położone są w północnym Krakowie zlokalizowane przy al. Gen. T. Bora-Komorowskiego 37. Centrum handlowe z hipermarketem Auchan było jednym z pierwszych wielkopowierzchniowych obiektów tego typu w całym Krakowie. Otwarte w 1997 roku było jednym z pierwszych sklepów rozległej strefy handlowo-rozrywkowej (strefa Olsza), w której działa szereg innych obiektów wielkopowierzchniowych takich jak Centrum Handlowe Krokus, Serenada, Multikino, market budowlany OBI oraz kryty park wodny. Zaprojektowane przez Krzysztofa Ingardena, zostało przebudowane w 2020 roku i poszerzone o dwukondygnacyjny parking. Przed południową fasadą budynku znajduje się kompozycja zieleni (krzewy i rośliny okrywowe) z niewielkimi drzewami o kulistych koronach. Na pozostałym terenie zieleni wysokiej brak. Teren ma niskie walory kulturowe - wartością może być widok rozciągający się w kierunku południowym w stronę pasa startowego dawnego lotniska Rakowice- Czyżyny i terenów Lotniczego Parku Kulturowego. Współczesne fasady obiektów handlowych nie stanowią ograniczenia dla kształtowania

zieleni, w tym także wysokiej. Dopuszczalne znaczne przekształcenie kompozycji w zakresie podstawy oraz ścian wnętrza.

Place miejskie

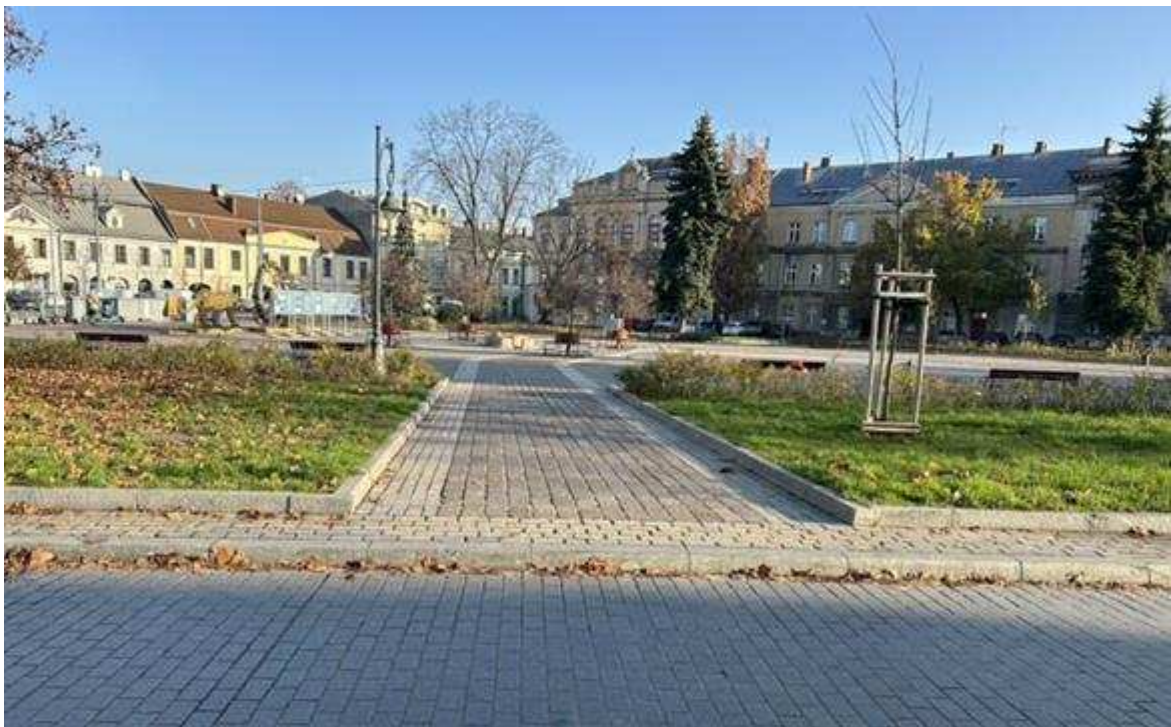
Rynek Podgórski

Obszar o wysokich wartościach kulturowych, które wynikają z walorów krajobrazu komponowanego. Duża powierzchnia brukowana, ale wyraźnie wydzielone obszary trawników i obecne okazy drzew wysokich. Niezbędna jest duża wrażliwość projektowa dla zachowania czytelności układu przestrzennego Rynku, w tym utrzymanie geometrii ścian wnętrza oraz jednorodności płaszczyzny podstawy. Istotne jest zachowanie osi widokowych. Przeprowadzona parę lat temu rewaloryzacja placu wzbudziła wiele emocji wśród mieszkańców Krakowa. Projekt krytykowano za zbyt mało nowych nasadzeń (ryc. 73, 74, 75).



Ryc. 73. Rynek Podgórski, widok w kierunku południowym.

Fot. T. Jaróg



Ryc. 74. Rynek Podgórski, widok w kierunku wschodnim.

Fot. T. Jaróg



Ryc. 75. Rynek Podgórski, widok w kierunku północnym, spod kościoła św. Józefa.

Fot. T. Jaróg

Plac im. Jan Nowaka Jeziorańskiego

Obszar o wysokich, choć zaburzonych wartościach kulturowych wynikających z walorów krajobrazu komponowanego, w którym łączą się wątki historyczne i współczesne. Niezbędne jest zachowanie charakteru ścian wnętrza od strony południowej i wschodniej (pierzeje budynków wzdłuż ul. Lubicz oraz elewacja dawnego budynku dworca kolejowego Kraków Główny. Płaszczyzna podstawy wnętrza krajobrazowego od strony południowej i wschodniej z niewielką ilością brył wolnostojących (ryc. 76, 77, 78).



Ryc. 76. Plac Jana Nowaka-Jeziorańskiego, widok w kierunku północnym.

Fot. T. Jaróg

Od strony zachodniej i północnej współczesne ściany wnętrza tworzone przez Galerię Krakowską oraz hotel. Dopuszczalna znacząca ingerencja zarówno w charakter ścian, jak i płaszczyznę podstawy wnętrza. Konieczne zachowanie czytelności bryły pałacyku Włodkowiczów.



Ryc. 77. Plac Jana Nowaka-Jeziorańskiego, widok w kierunku północno-zachodnim.
Fot. T. Jaróg



Ryc. 78. Plac Jana Nowaka-Jeziorańskiego, widok w kierunku zachodnim, na skwer przed Pałacem Wołodkowiczów (pro. Tadeusz Stryeński i Władysław Ekielski).
Fot. T. Jaróg

Nowy Kleparz

Obszar o umiarkowanych walorach kulturowych, wynikających z funkcji handlowej terenu. Ściany wnętrza słabo czytelne, płaszczyzna podstawy widoczna fragmentarycznie.

Dopuszczalne znaczne przekształcenie kompozycji zarówno w zakresie kształtowania ścian, jak i płaszczyzny podstawy wnętrza. W pobliżu znajduje się Park Kleparski za Bastionem III Kleparz oraz ogród otaczający dom opieki im. Helclów (ryc. 79, 80, 81).



Ryc. 79. Nowy Kleparz – skwer przy ul. Długiej, widok od strony zachodniej.

Fot. T. Jaróg



Ryc. 80. Nowy Kleparz, widok przez ul. Długą w kierunku zachodnim.

Fot. T. Jaróg



Ryc. 81. Nowy Kleparz, północno-zachodnia krawędź, od strony Alej Trzech Wieszców.

Fot. T. Jaróg

Osiedla bloków

Osiedla Szkolne

Przykład Osiedla Szkolnego w Nowej Hucie został wybrany jako obiekt referencyjny, w którym wskaźnik powierzchni biologicznie czynnych i powierzchni cieniowania jest najwyższy wśród porównywalnych zespołów zabudowy. Całkowita wielkość powierzchni biologicznie czynnej (niemal w całości na gruncie rodzimym, jedynie w niewielkim procencie jako „zielone dachy intensywne” na stropach budowli podziemnych) wynosi aż 43,42%. Całkowita powierzchnia cieniowana przez korony dojrzałych drzew jest zbliżona do obszaru powierzchni biologicznie czynnej i obejmuje swym zasięgiem także znaczną część terenów powierzchni utwardzonych, z uwzględnieniem ciągów komunikacyjnych (ryc. 82, 83, 84).



Ryc. 82. Osiedle Szkolne w Nowej Hucie.

Fot. T. Jaróg



Ryc. 83. Osiedle Szkolne w Nowej Hucie.

Fot. T. Jaróg



Ryc. 84. Osiedle Szkolne w Nowej Hucie.

Fot. T. Jaróg.

Osiedle Podwawelskie

Osiedle Podwawelskie zostało zbudowane w latach 1967-1976 na terenie dawnych przedmieść Ludwinów i Zakrzówek, które administracyjnie stały się częścią Krakowa w początku XX wieku. Rozplanowanie osiedla jest realizacją zwycięskiej koncepcji projektowej przygotowanej przez zespół pod kierunkiem profesora Witolda Cęckiewicza. Układ urbanistyczny wykorzystuje walory miejsca, a czteropiętrowe podłużne bloki ustawione są tak, aby umożliwić przewietrzanie zespołu (osie bloków wschód - zachód) i dobre nasłonecznienie mieszkań (ekspozycja fasad północ-południe, balkony i loggie od południa). Na zachodnio-południowych, zachodnich i wschodnich krańcach zaplanowano pięć bloków-punktowców. Autorami projektów architektonicznych są znani krakowscy architekci moderniści działający w tym okresie w zespole pod kierunkiem prof. Witolda Cęckiewicza, którzy posługiwali się technologią budownictwa prefabrykowanego (Wiśniewski, 2015) (ryc. 85, 86, 87, 88).



Ryc. 85. Osiedle Podwawelskie.

Fot. T. Jaróg.

Pomimo wkraczania na obrzeża osiedla współczesnej zabudowy usługowej (okolice centrum kongresowego ICE, wzdłuż ul. Konopnickiej) oraz mieszkaniowej (ul. Twardowskiego, Kapelanka) na osiedlu Podwawelskim wskaźnik powierzchni biologicznie

czynnych i powierzchni cieniowania jest nadal bardzo wysoki. Centrum osiedla nadal stanowi oś północ-południe z ul. Komandosów oraz zachowany jest zaplanowany pas zieleni rekreacyjnej. W relatywnie sporych zielonych przestrzeniach międzyblokowych wciąż rośnie wiele dojrzałych okazów drzew. Zalecane jest wykorzystanie istniejących walorów terenu, zachowanie powierzchni biologicznie czynnych i ostrożność w dogęszczaniu zabudowy. Możliwe jest wprowadzenie ulepszeń w zakresie wykorzystania wód opadowych w celu poprawy warunków wzrostu roślin w ramach istniejących terenów zielonych.



Ryc. 86. Osiedle Podwawelskie – zielen między blokami.

Fot. T. Jaróg.



Ryc. 87. Osiedle Podwawelskie – zieleń o charakterze rekreacyjnym wokół placu zabaw.
Fot. T. Jaróg.



Ryc. 88. Osiedle Podwawelskie – wewnętrzna uliczka.
Fot. T. Jaróg.

Osiedle Europejskie – Ruczaj

Osiedle Europejskie na południowo-zachodnim krańcu Krakowa było budowane przez firmę deweloperską w 11 etapach od 2002 roku na dawnych terenach porolniczych. Jako pierwszy powstał zespół “Londyn” zlokalizowany bezpośrednio przy ul. M. Bobrzyńskiego. Główną osią dla pięciopiętrowych bloków wybudowanych w ramach pierwszych 6 zespołów (Londyn, Paryż, Rzym, Barcelona, Praga, Wiedeń) jest biegnąca pod górę z północy na południe uliczka łącząca ul. M. Bobrzyńskiego z ul. Lubostroń. Regularne kwartały zabudowy mają ograniczoną możliwość kształtowania wysokiej zieleni w obszarze wewnętrznych “dziedzińców” ze względu to, że w spadku zbocza wykonano garaże podziemne i brak odpowiedniej warstwy gruntu rodzimego. Z kolei wzdłuż ciągów komunikacyjnych dominują niewielkie przyuliczne gatunki o kulistych koronach, które nie mają dobrych warunków do wzrostu i bywają dość często wymieniane. Okazałych drzew jest niewiele, gęstość zabudowy nie jest równoważona odpowiednią ilością zieleni. Powierzchnia biologicznie czynna jest zasadniczo zgodna z przyjętym parametrami urbanistycznymi, ale stopień uszczelnienia utrudnia wprowadzenie większych okazów zieleni. Zabudowa współczesna, która może być z powodzeniem wzbogacona o nowe nasadzenia i rozwiązania NBS, ale wymagać to będzie rozwiązania konfliktów z infrastrukturą drogową oraz instalacjami podziemnymi (ryc. 89, 90, 91).



Ryc. 89. Osiedle Europejskie – wewnętrzna uliczka łącząca ul. Lubostroń z ul. Bobrzyńskiego, Ruczaj, widok w kierunku północnym w stronę pętli Czerwone Maki.

Fot. T. Jaróg



Ryc. 90. Osiedle Europejskie – wewnętrzna uliczka łącząca ul. Lubostroń z ul. Bobrzyńskiego, Ruczaj, widok w kierunku południowym, w stronę ul. Lubostroń.

Fot. T. Jaróg



Ryc. 91. Osiedle Europejskie – okolica pawilonu handlowego przy ul. Bobrzyńskiego, Ruczaj, widok w kierunku wschodnim.

Fot. T. Jaróg

Ciągi komunikacyjne

Ul. Wielicka

Ulica Wielicka, to jedna z głównych tras wylotowych z miasta - prowadzi na południowy wschód w kierunku Wieliczki. Analizowany fragment położony jest w pobliżu marketu OBI oraz Uniwersyteckiego Szpitala Dziecięcego (ul. Wielicka 265). Od strony północno-wschodniej znajduje się Park im. Jerzmanowskich. Powierzchnia zajęta przez ruch samochodowy jest znaczna – dwa trzyjezdniowe pasy ruchu oddzielone wąskim pasem trawnika. Od strony wschodniej linia tramwajowa, ścieżka rowerowa i trakt pieszy. Trakty piesze są słabo zacienione. Wprowadzenie zieleni wysokiej jest utrudnione ze względu na małe obszary powierzchni biologicznie czynnej oraz nagromadzenie instalacji podziemnych wzdłuż traktu. Zabudowa wokół współczesna, brak ograniczeń kompozycyjnych i historycznych do wprowadzania nowych elementów nasadzeń. Sugerowane wprowadzenie i utrzymanie zielonego torowiska oraz wykorzystanie możliwości wprowadzenia NBS w Parku Anny i Erazma Jerzmanowskich w celu poprawy warunków wodnych i wykorzystania wody opadowej (ryc. 92, 93).



Ryc. 92. Ulica Wielicka.

Fot. T. Jaróg



Ryc. 93. Ulica Wielicka.

Fot. T. Jaróg.

Ul. Stanisława Lema

To arteria komunikacyjna łącząca Al. Pokoju i Al. Jana Pawła II otwarta w 2014 roku i leżąca na granicy trzech dzielnic (Grzegórzek, Czyżyn oraz Prądnika Czerwonego). Ulica jest szeroka (sześć pasów jezdni, po trzy w każdym kierunku) i zaopatrzona w infrastrukturę towarzyszącą - chodniki oraz ścieżki rowerowe. Od wschodu przy ul. Lema znajduje się hala widowiskowo-sportowa Tauron Arena oraz Park Lotników Polskich. Przy ulicy zrealizowano nasadzenia z roślin okrywowych krzewów i niewielkich drzewek oddzielających trakty pieszo-rowerowe od jezdni. W otoczeniu architektura współczesna, brak ograniczeń kompozycyjnych limitujących wprowadzanie dalszych rozwiązań NBS oraz nasadzeń dużych drzew zwiększających zacienienie (ryc. 94, 95, 96).



Ryc. 94. Ulica Stanisława Lema

Fot. T. Jaróg



Ryc. 95. Ulica Stanisława Lema.

Fot. T. Jaróg.



Ryc. 96. Ulica Stanisława Lema, ciąg pieszy i rowerowy po stronie Parku Lotników Polskich oraz TAURON Areny.

Fot. T. Jaróg

Aleja Solidarności

Stanowi element zabytkowego układu urbanistycznego Nowej Huty. Ulica wytyczona w 1949 roku łączy Plac Centralny z budynkami dawnego Centrum Administracyjnego Huty im. T. Sendzimira. Arteria na całej długości jest dwujezdniowa z dwoma pasami ruchu w każdym kierunku, pośrodku znajduje się pas zieleni z torowiskiem. Trakty piesze oddzielone od ruchu kołowego są krzewami i nasadzeniami drzew. Po obu stronach ulicy rosną szpalery dojrzałych drzew oddzielające zabudowę. Jest to obiekt referencyjny o znacznej powierzchni biologicznie czynnej, pozwalającej na vegetację roślin. Przedstawia optymalną ilość zieleni skutkującą korzystną wielkością powierzchni cieniowania zmniejszających stres cieplny w warunkach fal upałów (ryc. 97, 98, 99).



Ryc. 97. Aleja Solidarności przy skrzyżowaniu z ul. Bulwarową.

Fot. T. Jaróg



Ryc. 98. Aleja Solidarności.

Fot. T. Jaróg.



Ryc. 99. Aleja Solidarności.

Fot. T. Jaróg

6. Propozycje realizacji nasadzeń lub modyfikacji infrastruktury zielonej w wybranych lokalizacjach

Na podstawie szczegółowej analizy uwarunkowań funkcjonalnych, formalnych oraz środowiska przyrodniczego dla każdej z wybranych lokalizacji przygotowano propozycje projektowe, które obejmują:

- kartę obiektu zawierającą jednakowe dla każdego miejsca informacje dotyczące stanu obecnego i projektowanego (załączniki od 1a do 12a),
- propozycję rozwiązań projektowych przedstawione na rzutach w skali 1:500 oraz 1:1000, które ze względu na duży format arkuszy stanowią załączniki do niniejszego opracowania (załączniki od 1b do 12b) (tab. 5).

Tab. 5. Wykaz kart obiektów i załączników mapowych dla analizowanych lokalizacji

Lokalizacja	Nr karty obiektu	Numer załącznika mapowego
1. Parkingi przy CH Zakopianka	1 a	1 b
2. Parkingi przy IKEA	2 a	2 b
3. Parkingi przy CH Serenada	3 a	3 b
4. Rynek Podgórski	4 a	4 b
5. Plac J. Nowaka Jeziorańskiego	5 a	5 b
6. Nowy Kleparz	6 a	6 b
7. Osiedle Szkolne	7 a	7 b
8. Osiedle Europejskie	8 a	8 b
9. Osiedle Podwawelskie	9 a	9 b
10. ul. S. Lema	10 a	10 b
11. ul. Wielicka	11 a	11 b
12. Aleja Solidarności	12 a	12b-1 12b-2

W kartach obiektów podano dane na temat stanu istniejącego i projektowanego dla każdego opracowania w zakresie powierzchni nieprzepuszczalnych, powierzchni terenów zieleni, powierzchni cieniowania, powierzchni biologicznie czynnej, informacje na temat roślinności (wysokiej, średniej, niskiej oraz okrywowej), składu gatunkowego i stanu fitosanitarnego, a także uwagi na temat uwarunkowań i szczegółowych rozwiązań przyjętych w projektach nasadzeń oraz gospodarowania wodą opadową.

Propozycje rozwiązań projektowych uwzględniają wskazanie możliwej lokalizacji poszczególnych elementów zagospodarowania terenu, z uwzględnieniem ich wymaganej

wielkości oraz ewentualnych kolizji z głównymi sieciami uzbrojenia terenu (kolektory kanalizacyjne, infrastruktura miejskiej sieci CO, sieci przesyłowe wysokiego napięcia. W przypadku ciągów komunikacyjnych oraz osiedli mieszkaniowych nie ingerowano w strukturę funkcjonalną układu komunikacyjnego, ani też w formę i rozwiązania architektoniczne budynków.

6.1. Właściwości i wymagania wybranych roślin

Dobór gatunków roślin wykorzystanych w poszczególnych rozwiązaniach projektowych jest zgodny z:

- Ustawą o gatunkach obcych - uwzględniona została zasada strefowania doboru gatunkowego, czyli w miarę oddalania się od obszarów zwartej zabudowy śródmiejskiej rośnie udział gatunków rodzimych. Jednocześnie w terenach związanych z istniejącymi ciekami wodnymi (ul. Wielicka – Park Jerzmanowskich z przepływającą rzeką Drwinką) w strefie nadbrzeżnej rzeki wykorzystano wyłącznie gatunki rodzime i ich odmiany,
- zasadą doboru siedliskowego – dostosowaniem wybranych gatunków do projektowanego układu siedlisk. Przyjęto założenie, że przekształcenie siedlisk w poszczególnych lokalizacjach (zwłaszcza w obszarach parkingów wielkopowierzchniowych) sprzyjać będzie wprowadzeniu i stabilizacji gatunków wrażliwych na ekstremalny klimat miejski. Na terenach, w których nie przewidziano znaczącego przekształcenia terenu, dobór gatunków uwzględnia istniejące uwarunkowania siedliskowe, w tym ograniczoną dostępność przestrzeni wzdłuż ciągów komunikacyjnych i narażenie w początkowej fazie wzrostu na stres cieplny. W każdej z lokalizacji uwzględnione zostało retencjonowanie i ponowne wykorzystanie wód opadowych do nawadniania istniejących i nowych nasadzeń, co sprzyjać będzie lepszej aklimatyzacji roślin, ich intensywniejszemu rozwojowi, a w konsekwencji także uzyskaniu w krótszym okresie efektu cieniowania i zmniejszeniu wskaźnika PET, przy jednoczesnym wzroście wskaźnika NDVI.

Szczegółowa charakterystyka roślinności w poszczególnych kategoriach obszarów studialnych

Parkingi wielkopowierzchniowe

Główną objętość projektowanej zieleni i najważniejszy element sprzyjający zwiększeniu powierzchni cieniowanej tworzą gatunki pnączy o zdrewniałych pędach, zrzucające liście na zimę. Uwzględniono tu wykorzystanie gatunków szczególnie szybko rosnących, których zastosowanie umożliwi szybkie uzyskanie efektu zacienienia powierzchni. Pnącza zostaną posadzone w nowo wykonanych, rozległych pasmach zieleni z nawadnianiem automatycznym, które wykorzystuje wodę ze zbiorników retencjonujących deszczówkę. Dzięki temu możliwe będzie zastosowanie także gatunków o wyższych wymaganiach siedliskowych, którymi są: kokornak pospolity, fallopia Auberta, dławisz pospolity, winobluszcz pięciolistkowy, aktinidia pstrolistna, winorośl wonna, glicynia.

Wzdłuż głównych ciągów dróg wewnętrznych proponuje się wykorzystanie gatunków szybko rosnących drzew o rozłożystych koronach, jak na przykład platan klonolistny. Jest to drzewo odznaczające się odpornością na trudne warunki klimatu miejskiego, co ma szczególne znaczenie w początkowej fazie kształtowania kompozycji. Na obszarach rozległych zielenców zastosowane zostały rodzime gatunki drzew, jakie występować mogą w zbiorowiskach roślinnych potencjalnie występujących na terenach objętych projektami, a więc między innymi: klon pospolity, lipa drobnolistna, dąb szypułkowy, jarzab pospolity – w obszarach o charakterze grądu oraz wierzba biała, olsza czarna – na terenach w otoczeniu projektowanych ogrodów deszczowych i sztucznych mokradeł. Dopuszcza się wykorzystanie odmian o barwnych liściach i pędach, a także – w uzasadnionych przypadkach – form pokrojowych (np. olsza czarna ‘Imperialis’).

Ze względu na funkcję pełnioną przez parkingi wielkopowierzchniowe, gatunki proponowane do wykorzystania jako roślinność okrywowa charakteryzują się niewielkim wzrostem i tolerancją na przycinanie. Są to między innymi: śnieguliczka Chenaulte’a, tawuła szara / nippońska ‘Snowmound’, tawulec pogięty, odmiany róż okrywowych.

W ogrodach deszczowych i sztucznych mokradłach zastosowanie znajdują gatunki roślin zielnych oraz niskie odmiany krzewów rosnących naturalnie na obszarach łąk trzęślicowych. Dobór gatunków uwzględnia ich walory estetyczne i łatwość utrzymania. Przykładowy dobór powinien w pierwszej kolejności promować gatunki rodzime, dopuszcza się stosowanie gatunków obcych. W projektowanych doborach znajdują się między innymi: trzęślica modra, trzcinnik leśny, wierzba purpurowa ‘Nana’, kosaciec

syberyjski, wiązówka błotna, kosaciec żółty, pełnik europejski, krwawnica pospolita, także jeżówka purpurowa.

Na projektowanych dachach zielonych planowane jest zastosowanie gotowych, dostępnych na rynku mat wegetacyjnych, których dobór powinien zostać dostosowany do możliwości technicznych zielonego dachu, wynikających z uwarunkowań konstrukcyjnych budynków. Przykładowe rozwiązania to mata rozchodnikowa (dla dachów o minimalnej grubości warstwy wegetacyjnej w zakresie 5-10 cm) lub łąka kwietna (dla systemów o grubości warstwy wegetacyjnej 15 cm lub większej).

Place miejskie

Dobory gatunkowe na terenach placów miejskich opracowane zostały dwutorowo. Z jednej strony, na obszarach, w których zaproponowane zostały znaczące przekształcenia (Plan im. Jana Nowaka-Jeziorańskiego), możliwe jest wykorzystanie roślin, dla których stworzone zostaną optymalne warunki rozwoju. W przypadku terenów, gdzie interwencja projektowa jest ograniczona względami kulturowymi lub funkcjonalnymi, wybór roślin uwzględnia zarówno istniejące siedlisko, jak i kontekst w postaci istniejącej roślinności wysokiej i niskiej. W każdym przypadku celem nadrzędnym jest zwiększenie powierzchni zacienienia, uwzględnione zostały także zasady kształtowania osi kompozycyjnych, co ma odzwierciedlenie w wykorzystaniu odmian pokrojowych drzew.

W doborze do nowych nasadzeń dominują gatunki i odmiany lipy (drobnolistnej i szerokolistnej), przewidziano także wykorzystanie platanu klonolistnego, ozdobnych odmian jabłoni (bez odmian o barwnych liściach) oraz wiśni piłkowanej ‘Kanzan’. Są to gatunki dobrze tolerujące warunki klimatu miejskiego. W każdym przypadku przewidziano realizację systemu nawadniającego, wykorzystującego retencjonowaną wodę opadową, co sprzyjać będzie poprawie warunków wzrostu roślin.

W przypadku zastosowania roślin okrywowych, dopuszcza się możliwość wykorzystania zarówno niskich krzewów, jak i roślin zielnych (bylin). Zarówno obszar Placu im. Jana Nowaka-Jeziorańskiego, jak i Rynku Podgórskiego, są przestrzeniami o bardzo silnej, geometrycznej kompozycji, w związku z tym konieczne jest zastosowanie gatunków i odmian krzewów dobrze znoszących formowanie, jak na przykład cis japoński i pośredni (odmiany nisko rosnące, np. ‘Nana’, ‘Densiformis’), tawuła nipponska ‘Snowmound’ oraz tawuła szara. Dobór roślin zielnych obejmuje gatunki o wysokich walorach estetycznych, długowiecznych, o niskich wymaganiach pielęgnacyjnych. Pod koronami drzew dobrze sprawdzi się bergenia sercolistna (zimozielona), odmiany funkii,

brunera wielkolistna (i jej odmiany), uludka wiosenna, odmiany liliowców (niektóre częściowo zimozielone), odmiany tawułki, odmiany piwonii (w lekkim ocienieniu).

Osiedla bloków wielorodzinnych

Gatunki roślin wykorzystanych w rozwiązaniach NBS pozostają w ścisłej relacji z istniejącym kontekstem przestrzennym. W tym przypadku doборы należy dostosować do istniejącego siedliska. W osiedlach o dobrze ukształtowanej strukturze zieleni, z dojrzałym drzewostanem, wykształcone siedlisko ma charakter zbliżony do naturalnego, z tego względu możliwe jest wykorzystanie gatunków o większej wrażliwości na warunki miejskie. W oparciu o przeprowadzoną inwentaryzację drzew we wszystkich lokalizacjach widoczne są pewne generalne tendencje, które pozwalają na wykluczenie niektórych gatunków i odmian z doborów. Należy w tym kontekście ująć między innymi: świerk pospolity i kłujący, wiśnię piłkowaną ‘Amanogawa’, jesion wyniosły. Warto także zwrócić uwagę na brzozę brodawkowatą, która choć zaliczana jest do gatunków pionierskich, łatwo opanowujących nowe siedliska, odznacza się wyjątkowo wrażliwym na uszkodzenia systemem korzeniowym. Z tego względu również ten gatunek powinno się wykluczyć z nasadzeń.

W poszczególnych projektach uwzględnione zostały gatunki typowe dla siedliska grądu (m. in. klon pospolity, lipa drobnolistna i szerokolistna, wiśnia piłkowana ‘Kanzan’) oraz – w sąsiedztwie projektowanych ogrodów deszczowych – także gatunki terenów podmokłych, jak wierzba biała. W obszarach projektowanych ogrodów deszczowy przewidziano także wykorzystanie roślin zielnych i niskich krzewów związanych naturalnie z siedliskami łąk trzęślicowych takich, jak: trzęślica modra, trzcinnik leśny, wierzba purpurowa ‘Nana’, kosaciec syberyjski, wiązówka błotna, kosaciec żółty, pełnik europejski, krwawnica pospolita, także jeżówka purpurowa. W każdym przypadku, warunki wzrostu istniejących i projektowanych roślin zostaną poprawione dzięki zastosowaniu retencji i ponownemu wykorzystaniu wody opadowej, która gromadzona będzie w szczelnych zbiornikach.

Ciągi komunikacyjne

Tereny zieleni położone w bezpośrednim sąsiedztwie głównych ciągów komunikacyjnych znajdują się pod wpływem wielu znaczących czynników stresowych, które znacząco wpływają na stan zdrowia roślin, ich długowieczność, a w konsekwencji także na możliwość uzyskania oczekiwanego zasięgu koron drzew, który daje zacienienie

powierzchni. W proponowanych rozwiązaniach projektowych dobór gatunków kształtowany był na podstawie różnorodnych strategii, dla których wspólnym celem jest zwiększenie powierzchni cieniowanej oraz utworzenie wielowarstwowych układów zieleni z grupami krzewów okrywowych pod koronami drzew. W każdym przypadku warunki wzrostu roślin ulegają poprawie dzięki wykorzystaniu retencjonowanej wody opadowej, gromadzonej w szczelnych zbiornikach podziemnych i dostarczanej poprzez automatyczny system nawadniający.

- Dostosowanie do istniejącego kontekstu – ulica z rozbudowaną obudową zieleni (Al. Solidarności). W takim przypadku weryfikacji podlega stan fitosanitarny istniejącego drzewostanu, a wybór gatunków do nowych nasadzeń powinien nawiązywać wizualnie do drzew już istniejących w taki sposób, by nie tworzyć wrażenia dysharmonii. Zastosowane gatunki winny charakteryzować się odpornością na warunki stresowe (głównie zasolenie, we wczesnym etapie adaptacji także wysoką temperaturę). Określony został następujący dobór gatunkowy: lipa szerokolistna ‘Rubra’, klon jawor ‘Atropurpureum’, wiąz gr. Resista, pod szpalerami drzew, wzdłuż ciągu komunikacyjnego: śnieguliczka Chenaulte’a w odmianach, tawulec pogięty ‘Crispa’, natomiast w klombach na skrzyżowaniach wykorzystano róże okrywowe w odmianach.
- Pasy zieleni wzdłuż ulic pozbawione drzew lub istniejące młode drzewa osłabione. W takich sytuacjach zdecydowano o opracowaniu doboru od podstaw, uwzględniając istniejące czynniki stresowe: wysoką temperaturę oraz możliwe zasolenie podłoża. Zakres proponowanych gatunków uwzględnia między innymi: lipę drobnolistną ‘Greenspire’, klon polny ‘Elsrijk’ (dla ul. Wielickiej) oraz platan klonolistny (dla ul. St. Lema). Pod szpalerami drzew – grupy niskich krzewów, np. lilak Meyera ‘Palibin’, śnieguliczka Chenaulte’a ‘Hancock’, tawuła drobna ‘Anthony Waterer’.
- Ogrody deszczowe i sztuczne mokradła. W przypadku ulic: St. Lema i Wielickiej, na działkach przylegających do pasa drogowego, ale znajdujących się w pewnym oddaleniu od jezdni, przewidziano wykonanie obszarów retencji wód opadowych i ich infiltracji w głąb profilu glebowego lub oddanie do cieków wodnych (rzeka Drwinka). Obszary przybrzeżne obsadzone zostaną roślinnością występującą naturalnie na terenach podmokłych i w toni wodnej. Uwzględniono zarówno gatunki drzewiaste (olsza czarna, gatunki i odmiany wierzb), jak i zielne trzęślica modra,

trzcinnik leśny, wierzba purpurowa 'Nana', kosaciec syberyjski, wiązówka błotna, kosaciec żółty, pełnik europejski, krwawnica pospolita, także jeżówka purpurowa, trzcina, manna mielec, bobrek trójlistkowy, grzybienie, i in.

Opisane powyżej zasady doboru roślin do różnych uwarunkowań miejskich są rozwiązaniem uniwersalnym, możliwym do wykorzystania w różnych sytuacjach przestrzennych, w odmiennym kontekście funkcjonalnym, nie stanowią także zamkniętego doboru. Należy zwrócić uwagę na stopniową zmianę podejścia do zastosowania gatunków drzew w obszarach śródmiejskich. W związku z postępującym ociepleniem klimatu, gatunki dotychczas stosowane w miastach przestają się dobrze sprawdzać, istnieje konieczność tworzenia nowych specyfikacji gatunkowych, w tym także uwzględniających zastosowanie gatunków o charakterze inwazyjnym, które w wielu sytuacjach jako jedyne są w stanie przetrwać w ciężkim klimacie miasta.

6.2. Nasadzenia a warunki hydrologiczne wybranych lokalizacji

Wprowadzenie kompleksowych rozwiązań z zakresu NBS wymaga uwzględnienia szerokiego wachlarza interwencji projektowych, które całościowo przekształcają przestrzeń w zakresie formy, ale także kontekstu środowiskowego. Z tego względu, w przypadku każdej analizowanej lokalizacji warunki hydrologiczne zostały dostosowane do projektowanych nasadzeń. Stało się to możliwe dzięki szerokiemu wykorzystaniu systemów nawadniających, których praca opiera się na wykorzystaniu retencjonowanej wody opadowej w szczelnych zbiornikach podziemnych.

Jak wykazały obliczenia (**patrz: karty obiektów w części: Załączniki**), objętość wody opadowej możliwej do wychwycenia obejmuje tysiące metrów sześciennych, która po podczyszczeniu może być ponownie wykorzystana do poprawy nawodnienia gleby. Takie rozwiązanie, choć kosztowne, przyczynia się do zmniejszenia odpływu powierzchniowego oraz wpływa korzystnie na odnawianie wód gruntowych, zapewniając jednocześnie optymalne warunki wzrostu i rozwoju roślin. W długofalowej perspektywie będzie to miało korzystny wpływ na długowieczność drzew, a w konsekwencji także na zwiększenie obszaru zacienienia, podniesienie wilgotności powietrza, obniżenie wskaźnika PET, poprawę jakości powietrza.

6.3. Projekty organizacji zielonej infrastruktury w wybranych lokalizacjach przedstawione na rysunkach schematycznych o zakresie i stopniu szczegółowości dopasowanych do lokalizacji z uwzględnieniem rozwiązań typowych proponowanych dla danego miejsca

Projekty proponowanych rozwiązań opartych na przyrodzie, które mogą poprawić komfort termiczny użytkowników przedstawiono w szczegółach dla wszystkich 12 lokalizacji na załączonych do opracowania kartach obiektów i planach zagospodarowania (**patrz Załączniki**). Poniżej zaprezentowane są **wybrane** wizualizacje możliwości projektowych w poszczególnych typach przestrzeni uwzględnionych w niniejszym opracowaniu.

Parkingi przy centrach handlowych



Ryc. 100. Wizualizacja utworzenia alei platanowej na osi CH Zakopianka oraz wprowadzenia pergoli zacieniających z pnączami nad stanowiskami parkingowymi.
Wizualizacja: T. Jaróg.

Największe pole do możliwych interwencji dawały lokalizacje parkingów przed wielkopowierzchniowymi centrami handlowymi – ze względu na dużą powierzchnię i brak ograniczających uwarunkowań widokowych i historycznych. Jednocześnie warto zaznaczyć, że są to tereny, w których ze względu na znaczną liczbę użytkowników działania poprawiające komfort termiczny byłyby dostrzegalne i zapewne docenione. Z drugiej strony wprowadzenie wszystkich proponowanych elementów projektowych (w tym wysokich drzew), wiązałoby się z kosztami radykalnej przebudowy infrastruktury drogowej

i sieci podziemnych, co jest wykonalne, ale kosztowne. Część rozwiązań - jak wprowadzenie zielonych dachów wymagałaby współpracy sektora prywatnego oraz wzmocnienia konstrukcji dachów obiektów. Tym niemniej zdecydowanie możliwe byłoby znaczące zwiększenie powierzchni biologicznie czynnej oraz powierzchni cieniowanej.



Ryc. 101. Plastyczne przedstawienie rzutu możliwości wprowadzenia zieleni w lokalizacji obejmującej parkingi przy CH Zakopianka.

Wizualizacja: T. Jaróg

Projekt zakłada gruntowną przebudowę układu komunikacyjnego i parkingów w celu wprowadzenia większej ilości zieleni. Jednocześnie zachowano w nim drogi pożarowe wymagane odrębnymi przepisami. W celu zwiększenia zacienienia nad miejscami parkingowymi proponuje się wprowadzenie pergoli o wysokości min. 6 m (konstrukcja stalowa) porośniętych różnymi gatunkami pnączy. Z kolei w pasach zieleni zaprojektowano krzewy okrywowe; wzdłuż głównych dróg posadzono platany. W pasach zieleni wprowadzono drzewa gatunków rodzimych: w rejonie ogrodów deszczowych wierzby i olchy. Proponowane rozwiązanie zielonego dachu dla centrów handlowych to dach zielony ekstensywny typu mata rozchodnikowa (o całkowitej masie systemu około 100 kg/m^2 i pojemności retencyjnej 20 mm). Zaplanowano ogrody deszczowe zasilane wodą podczyszczoną ze zbiornika retencyjnego, obsadzone roślinami zielnymi; w ogrodach deszczowych przewidziano również niewielkie wodotryski generujące aerozol wodny. Ponadto system nawadniający zapewnia nawodnienie zielonego dachu oraz zieleni na

gruncie rodzimym, wyposażony w zraszacze wynurzalne i linie kroplujące. Przyjęta objętość zbiornika szczelnego na deszczówkę: 13000 m³ (ryc. 100, 101, 102).



Ryc. 102. Radykalne zwiększenie powierzchni biologicznie czynnej na terenie parkingu przy CH Zakopianka przez utworzenie pasów wielopiętrowych nasadzeń oraz ogrodów deszczowych. Wizualizacja T. Jaróg.

Analogiczne propozycje opracowano dla parkingów przy sklepie IKEA (ryc. 103) oraz przy CH Serenada (ryc. 103, 104, 105).



Ryc. 103. Radykalne zazielenienie parkingu przy CH IKEA. Wizualizacja T. Jaróg.



Ryc. 104. Podkreślenie zielenią osi wejścia CH Krokus oraz wprowadzenie bujnej zieleni okrywowej oddzielającej pasy miejsc parkingowych. Wizualizacja T. Jaróg.



Ryc. 105. Wykorzystanie pergoli porośniętych pnączami jako struktur zacieniających parkingi przed CH Krokus. Wizualizacja T. Jaróg.

Proponowane rozwiązania wprawdzie skutkują pewną redukcją ilości miejsc parkingowych (dla CH Zakopianka o 16,5%, 27,6% IKEA, CH Krokus 24,9%), ale zwiększają liczbę miejsc parkingowych dla osób z niepełnosprawnościami oraz zdecydowanie zwiększają powierzchnię terenów zieleni (CH Zakopianka wzrost o 65%, IKEA – wzrost o 65,7%, CH Krokus – 2,5 razy więcej). Najbardziej spektakularnie może

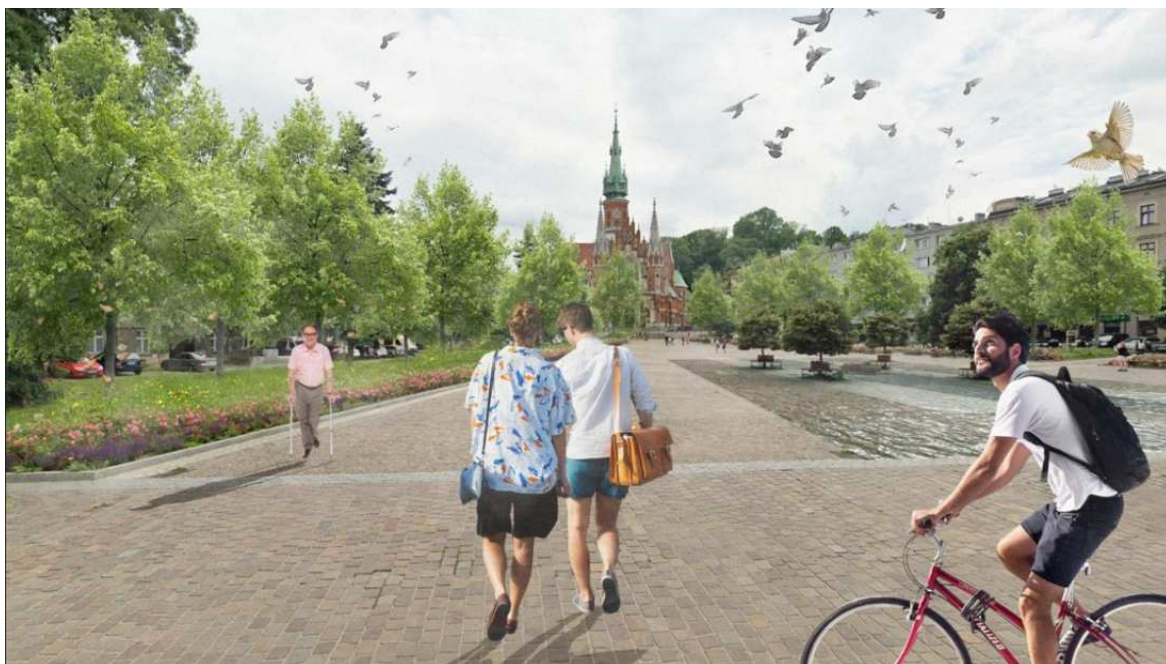
wzrosnąć powierzchnia cieniowania (CH Zakopianka ponad 21 razy, IKEA – 10 razy, CH Krokus – 9,5 razy więcej).

CH Zakopianka	STAN ISTNIEJĄCY	STAN PROJEKTOWANY	ROŻNICA	
Powierzchnie przepuszczalne [m ²]	53691,38	46459,27	-7232,11	
liczba miejsc postojowych	1182,00	987,00	-195,00	16,5 % mniej
liczba miejsc postojowych NP	34,00	38,00	4,00	12 % więcej
Powierzchnia terenów zieleni [m ²]	11102,58	18334,69	7232,11	Wzrost o 65%
Powierzchnia cieniowana [m ²]	1344,14	28733,63	27389,49	21,3 x więcej
Powierzchnia biologicznie czynna [%]	10,72	36,42	25,70	3,39 x więcej
IKEA	STAN ISTNIEJĄCY	STAN PROJEKTOWANY	ROŻNICA	
Powierzchnie przepuszczalne [m ²]	53834,43	41915,81	-11918,62	
liczba miejsc postojowych	1363	986	-377,00	27,6% mniej
liczba miejsc postojowych NP	9	21	12,00	133%
Powierzchnia terenów zieleni [m ²]	18553,7	30742,22	12188,52	wzrost o 65,7%
Powierzchnia cieniowana [m ²]	2907,48	30545,46	27637,98	10,5 x więcej
Powierzchnia biologicznie czynna [%]	19,34	44,14	24,80	2,28 x więcej
CH Krokus	STAN ISTNIEJĄCY	STAN PROJEKTOWANY	ROŻNICA	
Powierzchnie przepuszczalne [m ²]	38845,19	31866,78	-6978,41	
liczba miejsc postojowych	589,00	442,00	-147,00	24,9% mniej
liczba miejsc postojowych NP	9,00	22,00	13,00	144%
Powierzchnia terenów zieleni [m ²]	4570,23	11548,64	6978,41	152,60%
Powierzchnia cieniowana [m ²]	1325,42	12668,96	11343,54	9,55 x więcej
Powierzchnia biologicznie czynna [%]	6,28	36,04	29,76	5,7 x więcej

Place miejskie

Również znaczne powierzchnie wybrukowane na placach miejskich zachęcają do rozbetonowania i wprowadzenia większej ilości powierzchni biologicznie czynnej i zieleni wysokiej w celu poprawy klimatu lokalnego i zwiększenia komfortu użytkowania przestrzeni w gorące letnie dni. Jednak w przypadku tego rodzaju wnętrz urbanistycznych istnieje więcej uwarunkowań ograniczających możliwość interwencji - zwłaszcza, jeśli obszary te położone są w obrębie historycznej zabudowy podlegającej ochronie (jak na przykład Rynek Podgórski

- ryc. 106), a także istnieje skomplikowana infrastruktura podziemna i prawdopodobieństwo wystąpienia relikwów archeologicznych.



Ryc. 106. Uzupełnienie istniejącej zieleni wysokiej na Rynku Podgórskim, wzbogacenie już istniejących fragmentów przeznaczonych na zielen niską i trawniki oraz wprowadzenie tafli wody w nawierzchni.

Wizualizacja T. Jaróg.

Przykładem lokalizacji o uwarunkowaniach funkcjonalnych utrudniających wprowadzenie nowej zieleni jest plac targowy Nowy Kleparz. Występuje w nim znaczne natężenie ruchu kołowego wzdłuż wszystkich krawędzi terenu opracowania i z tego powodu jest ograniczona możliwość wprowadzenia zieleni wysokiej wokół placu. Wewnątrz ruch pieszy odbywa się pomiędzy ciasno rozmieszczonymi stoiskami handlowymi w układzie labiryntowym a dodatkowo wyznaczone są miejsca postojowe wzdłuż wschodniej i zachodniej krawędzi, skośnie do osi drogi. Ze względów funkcjonalnych projekt przewiduje zachowanie układu miejsc postojowych i układ komunikacyjny bez zmian.



Ryc. 107. Plastyczne przedstawienie widoku z góry możliwości zwiększenia zacienienia przez budowę zielonego zadaszenia nad placem Nowy Kleparz.

Wizualizacja T. Jaróg

W projekcie proponuje się usunięcie obiektów otaczających drzewo nr 4, utworzenie terenu zieleni na gruncie rodzimym z udziałem roślin zielnych (ryc. 107, 108).



Ryc. 108. Możliwa aranżacja zieleni wokół istniejącego drzewa przy Nowym Kleparzu – poprawa warunków wzrostu i nawodnienia.

Wizualizacja T. Jaróg

Zapewnieniu cienia służyć ma wykonanie wspólnego zielonego dachu ekstensywnego z matą wegetacyjną typu „Łąka Kwietna” nad wszystkimi stoiskami handlowymi. Uzupełnieniem będzie wykonanie zbiornika retencyjnego zbierającego deszczówkę

z powierzchni zielonego dachu łącznie z wykonaniem systemu nawadniającego zielony dach oraz zieleni na gruncie rodzimym. Przyjęta objętość zbiornika szczelnego na deszczówkę to 510 m³. Zwiększenie liczby drzew oraz powierzchni zielonych w ramach współczesnej interwencji projektowej w historycznym kontekście możliwe jest na Placu Jana Nowaka-Jeziorańskiego (ryc. 109, 110).



Ryc. 109. Wprowadzenie większej ilości zieleni na Placu Jana Nowaka-Jeziorańskiego
Wizualizacja T. Jaróg



Ryc. 110. Zwiększenie liczby drzew oraz powierzchni zielenców na Placu Jana Nowaka-Jeziorańskiego.
Wizualizacja T. Jaróg

Osiedla mieszkaniowe

Stare osiedla mieszkaniowe takie jak osiedle Szkolne w Nowej Hucie, czy osiedle Podwawelskie charakteryzują się obecnością dojrzałej bardzo różnorodnej, wielowarstwowej zieleni wysokiej i średniej zapewniającej wysoką powierzchnię cieniowania. Dodatkowo osiedle Szkolne jest położone w pobliżu zbiornika wodnego (Zalew Nowohucki). W trakcie inwentaryzacji zauważono jednak, że wody opadowe odprowadzane są wprost do kanalizacji – zatem brakuje w nich systemu przechwytywania deszczówki w celu powtórnego wykorzystania.



Ryc. 111. Plastyczne przedstawienie rzutu zieleni na osiedlu Szkolnym w Nowej Hucie.

Wizualizacja: T. Jaróg

Osiedla te można traktować jako referencyjne przykłady, w których właściwym działaniem będzie gromadzenie wody deszczowej i rozsądzanie w ogrodach deszczowych oraz pojedyncze uzupełnienia nasadzeń drzew o znaczeniu kompozycyjnym. Jednocześnie można przewidzieć sukcesywną i powolną wymianę okazów gatunków niedostosowanych do siedliska i klimatu miejskiego oraz wrażliwych na choroby takich jak świerk pospolity, jesion, wierzba mandżurska na gatunki zgodne z lokalną kompozycją i przystosowane do klimatu miejskiego (ryc. 111, 112, 113).



Ryc. 112. Wizualizacja możliwych nasadzeń uzupełniających o charakterze naturalistycznym w przestrzeniach międzyblokowych na Osiedlu Szkolnym w Nowej Hucie.

Wizualizacja: T. Jaróg



Ryc. 113. Wizualizacja ogrodów deszczowych możliwych do wprowadzenia na Osiedlu Szkolnym w Nowej Hucie.

Wizualizacja: T. Jaróg

Zdecydowanie innego rodzaju problemy mają osiedla mieszkaniowe budowane w ostatnich kilkunastu latach takie jak Osiedle Europejskie.



Ryc. 114. Plastyczne przedstawienie rzutu zieleni na fragmencie Osiedla Europejskiego.
Wizualizacja: T. Jaróg

Charakteryzuje je wysoki współczynnik gęstości zabudowy i niewielkie obszary powierzchni biologicznie czynnej oraz małą ilością zieleni wysokiej. Utrudnieniem we wprowadzaniu większej liczby wysokich drzew są zarówno niewielkie odległości między budynkami, ale także garaże podziemne, których stropodachy ze względów konstrukcyjnych mają ograniczoną nośność i możliwość przyjęcia warstwy wegetacyjnej (zatem możliwe sadzenie roślin o płytszym systemie korzeniowym) (ryc. 114, 115, 116).



Ryc. 115. Możliwe uzupełnienia w zakresie zieleni wysokiej na północnym krańcu Osiedla Europejskiego.
Wizualizacja T. Jaróg



Ryc. 116. Proponowane nasadzenia oddzielające osiedle Europejskie od ekranów akustycznych.
Wizualizacja T. Jaróg

Na obszarze os. Europejskiego interwencja projektowa ograniczona jest w głównej mierze zwiększenia poziomu retencji wód opadowych i ich ponownego wykorzystania do nawadniania istniejących terenów zieleni. Deszczówka gromadzona jest zarówno w szczelnych podziemnych zbiornikach, skąd będzie wykorzystana bezpośrednio do nawadniania, jak też w otwartych ogrodach deszczowych, gdzie będzie infiltrowała w głąb profilu glebowego.

Dodatkowo, w dostępnych przestrzeniach, szczególnie od strony ul. Bobrzyńskiego, wprowadzone zostały szpalery zieleni izolacyjnej, a w sąsiedztwie ogrodów deszczowych także roślinność charakterystyczna dla terenów podmokłych (patrz punkt 6.1).

Ulice

Ze względu na natężenie ruchu samochodowego, konieczność używania w zimie soli drogowej oraz nagromadzenie podziemnych sieci instalacji wzdłuż ruchliwych arterii komunikacyjnych, występują tam trudne warunki do wprowadzenia i wzrostu zieleni wysokiej, która może zwiększać zacienienie ciągów pieszych i rowerowych poprawiając komfort cieplny użytkowników. Istnieją jednak w Krakowie ulice, którym towarzyszy zieleni izolująca od pasów drogowych i jednocześnie zieleni wysoka dająca dużo cienia – przykładem takiej ulicy jest Aleja Solidarności w Nowej Hucie. W jej przypadku wskazane

są uzupełnienia zastanego układu zieleni i wzbogacenia roślinności w istniejących wydzielonych obszarach trawników i zieleńców (ryc. 117). Poprawa kondycji istniejącej zieleni i zapewnieni lepszych warunków wzrostu może nastąpić dzięki wykorzystaniu efektywnego gospodarowania wodami opadowymi do nawadniania.

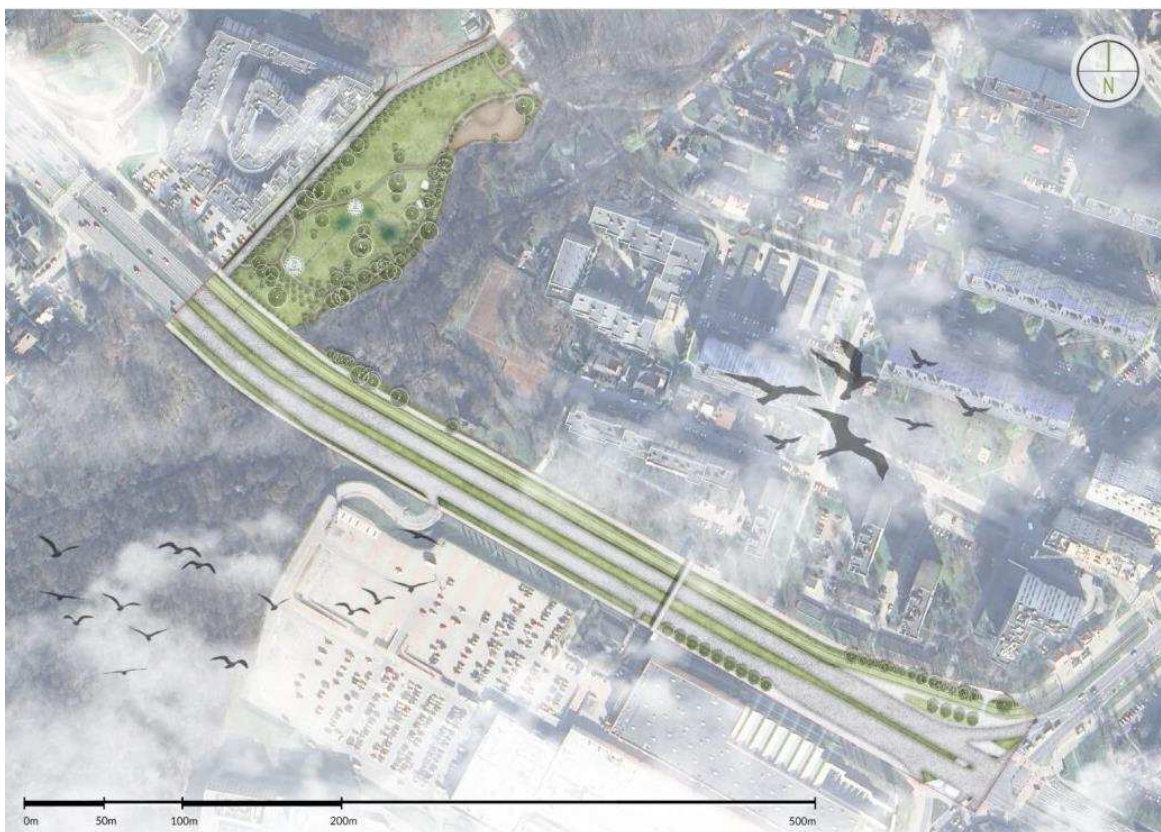


Ryc. 117. Symulacja przedstawiająca wzbogacony układ zieleni wzdłuż Alei Solidarności.

Wizualizacja: T. Jaróg

Projekty zmierzające do poprawy klimatu lokalnego czasem jednak muszą bazować na ograniczonych nasadzeniach i wykorzystywać maksymalnie wody opadowe.

Próbę takiego rozwiązania podjęto na odcinku ulicy Wielickiej. Wzdłuż tego ruchliwego ciągu komunikacyjnego (z pasem zieleni, torowiskami tramwajowymi biegnącymi równoległe do jezdni i ciągami pieszo-rowerowymi) można zaprojektować ograniczoną liczbę drzew.



Ryc. 118. Plastyczne przedstawienie rzutu możliwości wprowadzenia zieleni na odcinku ulicy Wielickiej.

Wizualizacja: T. Jaróg

Przewidziano kilka okazów lipy drobnolistnej ‘Greenspire’ oraz klonu polnego ‘Elsrijk’ uzupełnionych o krzewy okrywowe w pasie zieleni wzdłuż ul. Wielickiej, w miejscach bez kolizji z sieciami uzbrojenia. Głównym działaniem stało się zwiększenie stopnia retencji wód opadowych z fragmentu nawierzchni ciągów jezdnych ul. Wielickiej. Woda opadowa ma być odprowadzana przez istniejącą kanalizację opadową do zbiornika szczelnego i dalej do sztucznego mokradła na terenie pobliskiego Parku Jerzmanowskich, gdzie ma być oczyszczana i może być oddana bezpośrednio do rzeki Drwinki. Lokalizacja zbiornika na deszczówkę proponowana jest w południowym krańcu parku. Woda wykorzystywana ma być do nawadniania oraz ma płynąć przelewem do sztucznego mokradła (wierzba purpurowa, byliny tolerujące okresowe zalewanie, rośliny zielne do terenów podmokłych). System nawadniający ma umożliwić nawadnianie dokorzeniowe drzew, w pierwszej kolejności - zielonego torowiska oraz zieleni wzdłuż ul. Wielickiej, awaryjnie także parku Jerzmanowskich (ryc. 118, 119, 120).



Ryc. 119. Proponowane nasadzenia wzdłuż ul. Wielickiej.

Wizualizacja T. Jaróg



Ryc. 120. Sztuczne mokradło w Parku Jerzmanowskich jako element retencji wód opadowych.

Wizualizacja: T. Jaróg

Ze względu na szerokości i układ istniejących pasów zieleni wzdłuż ul. Stanisława Lema wzdłuż tej arterii istnieje możliwość zwiększenia liczby większych drzew rzucających cień oraz roślin okrywowych, które ograniczą nagrzewanie powierzchni (ryc. 121).



Ryc. 121. Zwiększenie intensywności nasadzeń drzew i krzewów wzdłuż ul. Stanisława Lema.
Wizualizacja: T. Jaróg

7. Ocena możliwego oddziaływania zaprojektowanych rozwiązań z zakresu zielonej infrastruktury na warunki termiczne i bioklimatyczne Krakowa

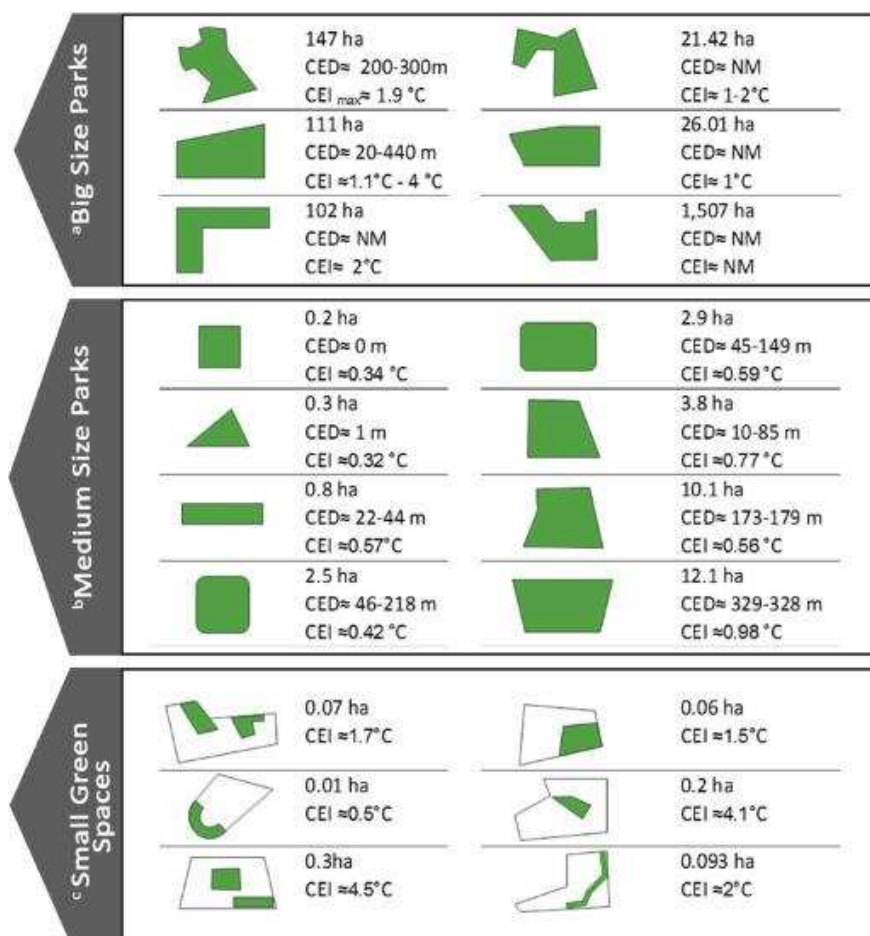
Próba oszacowania wpływu planowanych rozwiązań na kształtowanie temperatury powietrza i obciążenia cieplnego człowieka bazuje na wynikach badań z innych ośrodków miejskich, przy uwzględnieniu ich wielkości i położenia geograficznego. Należy przy tym zaznaczyć, że taka analogia zawsze jest obarczona marginesem błędu co wynika z faktu, że każde miasto funkcjonuje w nieco innych realiach środowiskowych i tylko dokładne badania mikroklimatyczne przeprowadzone przed realizacją danego projektu nasadzeń i po jego wykonaniu mogłyby pokazać rzeczywisty wpływ danej inwestycji na klimat lokalny. Kolejna kwestia wymagająca dodatkowych objaśnień to rozróżnienie między warunkami termicznymi i bioklimatycznymi. W pierwszym przypadku rozpatruje się zmiany parametrów fizycznych atmosfery wyznaczane poprzez pomiary wykonywane według określonych standardów. W drugim przypadku rozpatrywany jest stan termiczny organizmu ludzkiego kształtowany przez jego bilans cieplny. Procesy termoregulacji przebiegają inaczej u każdego człowieka, gdyż zależne są m.in. od wieku, stanu zdrowia, trybu życia. Wyznacza się jednak wartości wskaźników bioklimatycznych przy określonych założeniach, co umożliwia porównanie

obciążenia cieplnego np. między różnymi miejscowościami. Rozróżnienie metod stosowanych w obu podejściach zostało już opisane w rozdziale 1. Niniejszy rozdział ma za zadanie pokazać czy wprowadzanie nowych terenów zielonych na obszarze Krakowa zmieni zarówno warunki termiczne, jak bioklimatyczne.

W rozdziale 3 niniejszego opracowania zwrócono uwagę, że wyniki licznych prac pokazują, że zieleń w mieście pozwala miejscowo obniżyć temperaturę powietrza o ok. 1-2°C, a dla wskaźników biometeorologicznych rezultat jest nieco lepszy. Można w tym miejscu przywołać badania przeprowadzone w Warszawie (Błażejczyk, Kuchcik 2020), gdzie porównano temperaturę powietrza w okresie zimowym i letnim, przy pogodzie radiacyjno-insolacyjnej w trzech lokalizacjach: Śródmieście (udział powierzchni biologicznie czynnej 16%), Mokotów (49%) i Ogród Botaniczny w Powsinie (77%). Zimą w ciągu dnia temperatura powietrza była prawie taka sama we wszystkich punktach, zaś nocą w Ogrodzie Botanicznym o 3,0-4,5°C niższa. Latem w dzień w centrum miasta notowano jednak temperaturę niższą nawet o 2,2°C niż w Ogrodzie Botanicznym, zaś nocą, podobnie jak zimą, temperatura powietrza w Ogrodzie Botanicznym była niższa - nawet o 9,9°C w porównaniu z centrum miasta. Parki miejskie w sezonie wegetacyjnym traktowane są jako oazy chłodu i wilgoci. Jak jednak podkreślają autorzy w bezwietrzne, gorące dni, podwyższona wilgotność powietrza i zmniejszone przewietrzanie w parkach powodują, że warunki biotermiczne mogą tam być obciążające dla człowieka. Natomiast wpływ trawników, najpopularniejszej formy zieleni miejskiej, na temperaturę powietrza zależy głównie od ich wielkości. Dopiero trawniki o powierzchni około 2500-3000 m² i większe mogą sprzyjać generowaniu lokalnych przepływów powietrza. Obciążenie cieplne organizmu człowieka badano posługując się wskaźnikiem UTCI (opisanym w rozdz. 1 niniejszego opracowania). Stwierdzono, że rola zieleni jako czynnika łagodzącego obciążenia cieplne jest szczególnie widoczna podczas pogody gorącej i wilgotnej ze słabym wiatrem. W obrębie parków obciążenia cieplne są 1,5-2,0°C (UTCI) mniejsze niż wśród gęstej zabudowy, a w lasach zmniejszenie obciążeń cieplnych sięga maksymalnie 4-5°C. Także w obrębie zabudowy rozproszonej, gdzie występuje roślinność osiedlowa i przydomowa, obciążenia cieplne są mniejsze o 1,5-2,0°C niż w gęsto zabudowanym centrum miasta. W opracowaniu dla Wiednia, z wykorzystaniem kilku modeli mezoklimatycznych, uzyskano podobne wyniki dotyczące temperatury powietrza. Autorzy zwrócili jednak uwagę na to, że ochładzający wpływ terenów zielonych na temperaturę powietrza jest widoczny nocą, podczas gdy w dzień jest tak niewielki, że zanedbywalny (Reinwald i in., 2021). W nocy jednak efekt ten wpływa nie tylko na zmniejszenie intensywności miejskiej wyspy ciepła, ale także na zmniejszenie ryzyka wystąpienia nocy

tropikalnych. Badania bioklimatyczne dotyczące wpływu zieleni miejskiej na bilans cieplny ciała człowieka także są prowadzone zarówno poprzez pomiary terenowe, jak też wykorzystanie modeli mikro- i mezoklimatycznych. Przykładowo Matzarakis i Fröhlich (2018) stwierdzili, że warunki bioklimatyczne w mieście można poprawić poprzez zapewnienie zacienienia i przepływu powietrza (lekkiego wiatru). Zapewnienie osłony przed bezpośrednim promieniowaniem słonecznym powoduje, że nie dociera ono do ciała człowieka, czy to bezpośrednio na skórę, czy na ubranie. Promieniowanie słoneczne dostarcza dużych dawek energii i jeśli dotrze do ciała człowieka to ta energia jest pochłaniana przez skórę i powoduje wzrost jej temperatury. To zaś powoduje, że przy panującej cały czas tej samej temperaturze powietrza, obciążenie cieplne organizmu człowieka wzrasta. Organizm człowieka cały czas produkuje ciepło metaboliczne i musi się go częściowo cały czas pozbywać aby zachować stałą temperaturę. Duża dodatkowa dostawa ciepła na skutek wystawienia na bezpośrednie promieniowanie słoneczne jest wyzwaniem dla mechanizmów termoregulacyjnych człowieka, zwłaszcza w przypadku osób starszych i schorowanych (u których te mechanizmy już nie działają prawidłowo) oraz dzieci (u których te mechanizmy jeszcze nie są całkowicie wykształcone). Nadmierna ekspozycja na słońce, czyli dostarczenie organizmowi człowieka zbyt dużej dawki promieniowania słonecznego w stosunku do możliwości termoregulacyjnych organizmu może skutkować nawet udarem cieplnym. Przy wysokiej temperaturze powietrza przebywanie w cieniu jest podstawową metodą ochrony przed stresem cieplnym. Drugim najważniejszym elementem jest zapewnienie sobie niewielkiego przepływu powietrza dzięki czemu mechanizmy termoregulacyjne ludzkiego organizmu mogą działać efektywnie. W warunkach wysokiej temperatury głównym mechanizmem termoregulacyjnym jest bowiem pocenie się. Pot parując z powierzchni skóry zużywa duże ilości energii pobieranej z otoczenia, w tym z ciała człowieka. Przepływ powietrza, czyli wiatr lub przepływ wywołany sztucznie, np. wentylatorem przyspiesza parowanie potu dzięki czemu chłodzenie organizmu przebiega sprawniej. W kontekście tych stwierdzeń należy podkreślić, że zacienienie na terenach otwartych miasta można uzyskać na wiele sposobów jak to pokazano na ryc. 12 i w rozdz. 4. Wprowadzanie zieleni w przestrzeń miejską jest tylko jednym ze sposobów, a należy przy tym rozważyć czy urządzenie danego terenu zielonego w określonej lokalizacji nie spowoduje zmniejszenia przepływu powietrza. Rycina 122 pokazuje podsumowanie badań przeglądowych Arama i in. (2019), w których wykorzystywano zarówno dane satelitarne jak i pomiary naziemne temperatury powietrza, z których wynika, że tylko duże zwarte parki o powierzchni powyżej 10 ha mogą obniżyć

temperaturę powietrza, ale zaledwie o 1–2 °C. Takie oddziaływanie ma miejsce na terenie samego parku i maksymalnie do 350 m od granic parku.



Ryc. 122. Wpływ wielkości i zwartości terenu zielonego na wielkość obniżania temperatury powietrza (ang. CEI – Cooling Effect Intensity) oraz zasięg przestrzenny jego oddziaływania (ang. CED – Cooling Effect Distance), na podstawie wielu badań temperatury powietrza i powierzchni.

Źródło: Aram i in. 2019

W Krakowie od dawna były prowadzone nie tylko badania mikro- i mezoklimatologiczne, ale także biometeorologiczne. W kontekście celu niniejszego opracowania warto przywołać opracowanie Niedźwiedzia i in. (1994-1995). Autorzy wyznaczyli wybrane wskaźniki bioklimatyczne dla centrum Krakowa (Ogród Botaniczny), przedmieść (Wola Justowska) i terenów podmiejskich (Balice) na podstawie danych z lat 1966-1992. Analiza wartości normalnej temperatury efektywnej (NTE) pokazała, że częstość występowania warunków komfortu termicznego latem nie wykazuje różnicowania między badanymi punktami, czyli warunki komfortu występują z taką samą częstością w różnych częściach miasta. W pozostałych porach roku dużo częściej występują one w śródmieściu niż w innych punktach miasta. Stwierdzono dużą zależność różnicowania warunków bioklimatycznych Krakowa od napływu

mas powietrza. W centrum miasta zanotowano w skali roku zwiększenie częstości dni ciepłych i gorących wg NTE; było ich 10-11 więcej niż na przedmieściach czy terenach podmiejskich. Jednak największe zróżnicowanie warunków bioklimatycznych odnotowano zimą. Z nowszych prac można przywołać opracowanie Wieczorek i in. (2024). Pokazano, że w gęstej zabudowie w centrum Krakowa (kampus AGH), w okresie 2012-2022, silny stres ciepła (czyli wartości UTCI większe lub równe 32°C) wystąpił we wszystkich tych latach w miesiącach od kwietnia do września w czasie 448 dni łącznie (co daje średnio 41 dni w roku), ale głównie w lipcu i sierpniu. Praca Błażejczyka i Twardosza (2023) także pokazuje zmiany UTCI o wartości większej lub równej 32°C , ale w Ogrodzie Botanicznym a ponadto zastosowano inną metodę obliczania UTCI, dlatego wyniki obu prac nie mogą być bezpośrednio porównywane; w tej pracy jednak w podobnym okresie roczna liczba dni z silnym stresem ciepła wahała się między 25 a 35.

W niniejszym opracowaniu zawarto przykładowe projekty, wykonane przy uwzględnieniu informacji z literatury fachowej oraz eksperymentów i pomiarów opisanych w publikacjach naukowych na temat pozytywnego wpływu elementów błękitnej i zielonej infrastruktury na warunki biotermiczne. W projektach podjęto próbę zwiększenia powierzchni biologicznie czynnej oraz powierzchni cieniowanej w różnych obszarach miasta przez zastosowanie nasadzeń drzew oraz wprowadzenie pnączy na podporach. Jednocześnie zastosowano szereg rozwiązań w celu zwiększenia retencji wód opadowych, aby móc je powtórnie wykorzystać do nawadniania wprowadzonej zieleni w celu zapewnienia jej trwałości i optymalnego wzrostu.

Jednoznacznej odpowiedzi na ile dokładnie dzięki temu osiągnięto poprawę realnych parametrów współczynnika PET albo UTCI nie sposób podać, gdyż obliczenia te wykraczają poza zakres niniejszego opracowania, jednak mogą one być kolejnym etapem rozważań nad ww. projektami. Można byłoby próbować przeprowadzić symulacje obliczeniowe posługując się parametrami wynikającymi z przyjętych w projektach rozwiązań oraz uzupełniając je o dodatkowe niezbędne dane wynikające z położenia terenu w poszczególnych rejonach miasta i współczynniki dotyczące grup osób korzystających z badanych przestrzeni.

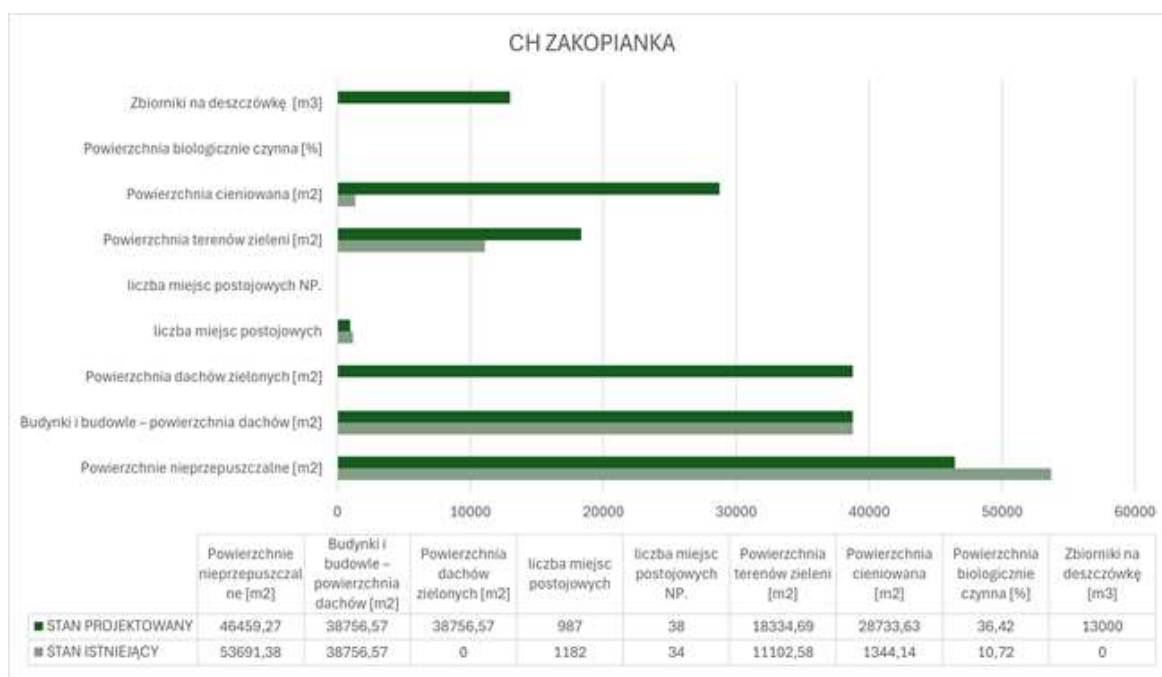
Jednoznacznie można jednak wnioskować na podstawie przeglądu projektów, że gdyby zostały zrealizowane to można by stwierdzić, że:

- nastąpiło zwiększenie powierzchni biologicznie czynnej – w niektórych obszarach bardzo znaczące (nawet jeśli powierzchnie proponowanych zielonych dachów wliczać zgodnie

z właściwym rozporządzeniem, które stanowi, że w przypadku zielonego dachu powierzchnia biologicznie czynna to połowa jego całkowitej powierzchni);

- w wielu miejscach został zwiększony stopień przepuszczalności nawierzchni umożliwiający wsiąkanie wód opadowych i ograniczający spływ powierzchniowy;
- nastąpiło zwiększenie zacienienia przez zwiększenie liczby drzew, których korony rzucają cień;
- zwiększenie powierzchni biologicznie czynnej i zwiększenie liczby drzew oraz wprowadzenie wody stojącej zwiększyło ewapotranspirację;
- w projektach zapewniono retencję 100% wody opadowej w danym miejscu (przy uwzględnieniu średnich rocznych i miesięcznych sum opadów);
- zaproponowano zestawy roślin zwiększające bioróżnorodność;
- zaproponowano rozwiązania zwiększające atrakcyjność wizualną lokalizacji – dzięki wprowadzeniu zróżnicowanych kompozycji roślinnych, drzew, pnączy na podporach oraz wody stojącej.

Na rycinach 123, 124 i 125 zaprezentowano zestawienia najważniejszych parametrów ukazujące stan istniejący i projektowany dla najbardziej spektakularnych przekształceń, które można próbować wprowadzić na obszarach parkingów przy wielkopowierzchniowych centrach handlowych, przy których istnieje najmniej ograniczeń ze względów historycznych, kompozycyjnych i krajobrazowych. Jednakże realizacja tego rodzaju ambitnych zamierzeń będzie się wiązała z gruntowną przebudową układu komunikacyjnego i funkcjonalnego otoczenia. Projektanci zdecydowali się nie dokonywać drastycznych redukcji ilości miejsc parkingowych, a w zakresie miejsc parkingowych dla osób z niepełnosprawnościami we wszystkich projektach ich liczba została zwiększona. Na szczególną uwagę zasługuje we wszystkich trzech przypadkach znaczący wzrost powierzchni, która w słoneczne dni będzie znajdować się w cieniu. Jak opisano powyżej jest to najważniejszy czynnik zewnętrzny kształtujący bilans cieplny człowieka w przestrzeni miejskiej w upalne dni.



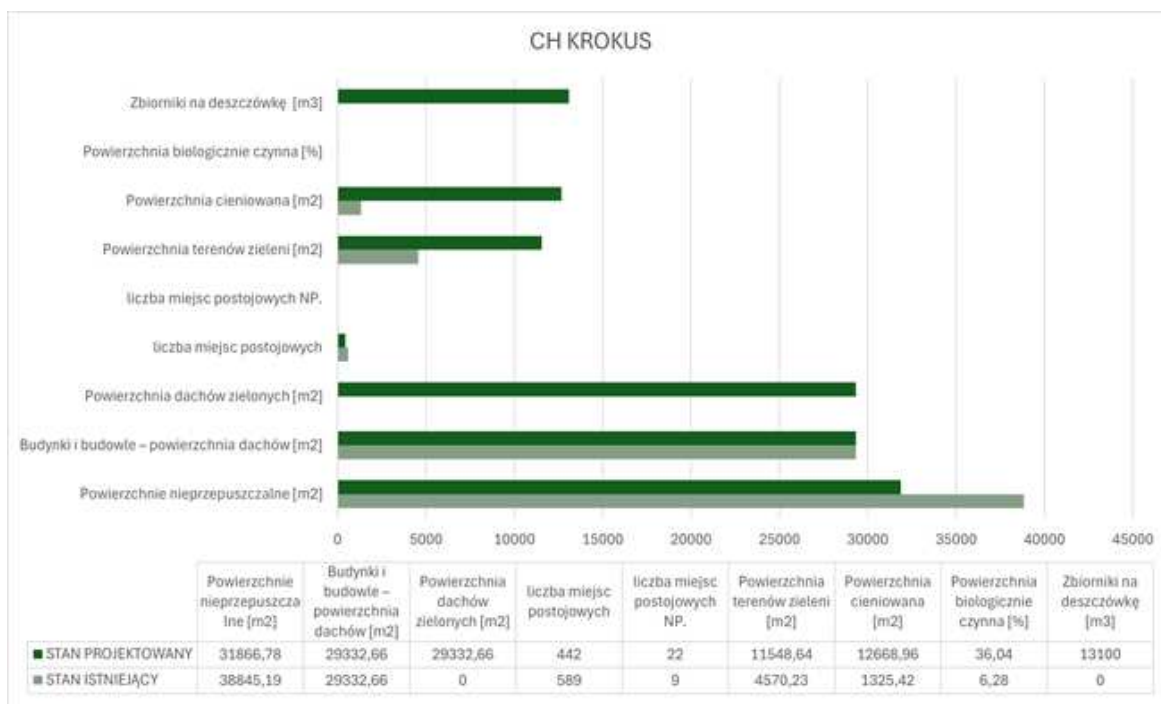
Ryc. 123. Zestawienie parametrów stanu istniejącego i projektowanego dla parkingów przy CH Zakopiańska, na podstawie karty projektu.

Oprac. A. Staniewska



Ryc. 124. Zestawienie parametrów stanu istniejącego i projektowanego dla parkingów przy CH IKEA, na podstawie karty projektu.

Oprac. A. Staniewska



Ryc. 125. Zestawienie parametrów stanu istniejącego i projektowanego dla parkingów przy CH Krokus, na podstawie karty projektu.

Oprac. A. Staniewska

Na podstawie przeprowadzonych szczegółowych analiz i opracowanych rozwiązań koncepcyjnych z zakresu NBS, można określić główne wytyczne dla przyszłych działań projektowych w terenach zieleni publicznej:

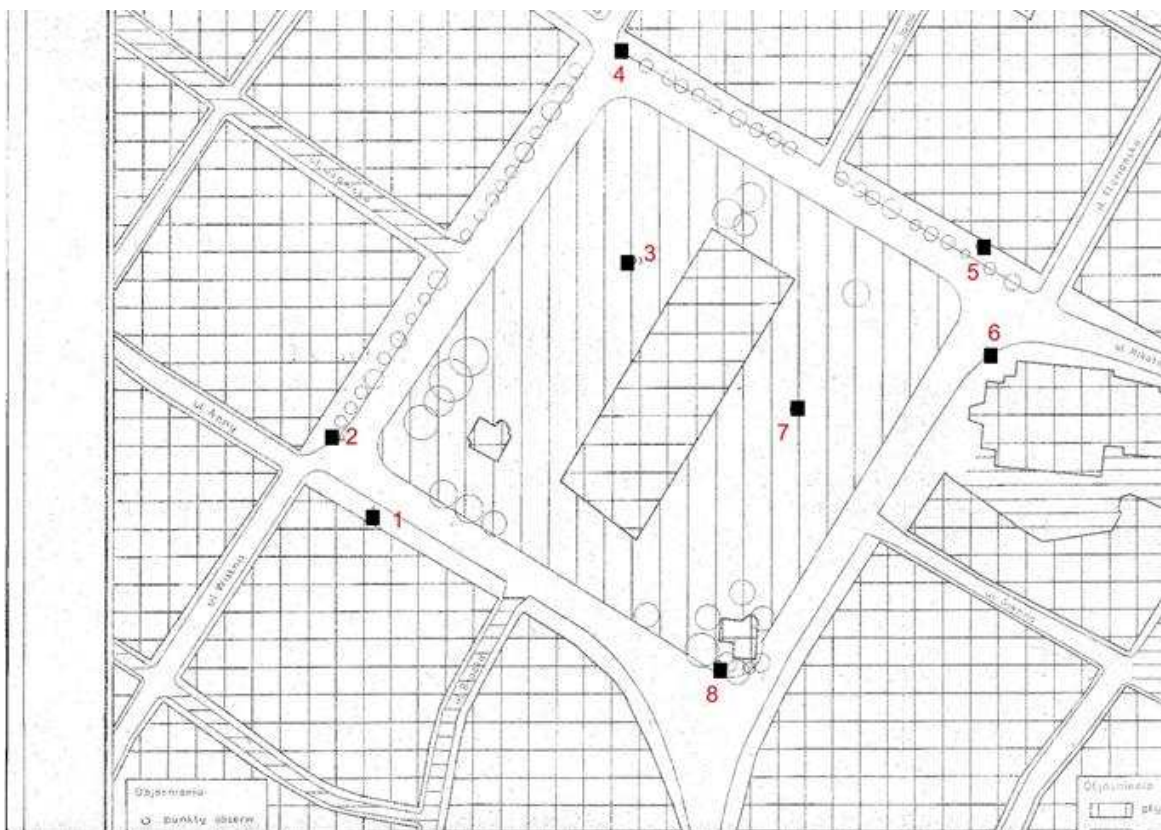
- jedynie całościowe, holistyczne podejście do projektowania, które uwzględnia wielopłaszczyznowe działania prowadzące niekiedy do znacznego przekształcenia obszaru opracowania, może prowadzić do osiągnięcia zamierzonego celu, jakim jest poprawa komfortu termicznego mieszkańców. Retencja wód opadowych i ich ponowne wykorzystanie jest jednym z narzędzi, które – jako „skutki uboczne” – prowadzi także do poprawy stanu środowiska przyrodniczego, sytuacji hydrologicznej, etc.
- w skali urbanistycznej należy dążyć do projektowania możliwie rozległych obszarów pokrytych wielowarstwowym układem zieleni, z retencją wód opadowych w postaci otwartych zbiorników wodnych. Jak wykazują badania naukowe, zwiększenie powierzchni terenu zieleni jest skorelowane pozytywnie z intensywnością jego chłodzącego oddziaływania. Dodatkowo obecność otwartego zwierciadła wody wzmacnia efekt chłodzący.

W skali projektowej działania holistyczne powinny uwzględniać: zastosowanie zielonych dachów (należy dążyć do obowiązkowego stosowania tego rozwiązania, przy założeniu zapewnienia minimalnej pojemności retencyjnej na poziomie 50 l/m², co umożliwi zatrzymanie opadu burzowego nawet o dużym natężeniu); nasadzenia drzew o rozłożystych koronach wzdłuż ulic (drzewa kolumnowe lub o koronach kulistych jedynie w wąskich ulicach śródmiejskich); przy projektowanych nowych obiektach wielkopowierzchniowych zapewnienie zacienienia min. 50% powierzchni nieprzepuszczalnych oraz retencja wód opadowych z ich ponownym wykorzystaniem (zakaz stosowania rozwiązań otwartych, spowalniających odpływ do kanalizacji deszczowej). Należy mieć na względzie fakt, iż przyjęte w niniejszym opracowaniu standardy obliczenia niezbędnej pojemności retencyjnej zbiorników na deszczówkę znacząco przewyższają parametry wynikające z wielkości opadu miarodajnego, która jest zwyczajowo uwzględniana do obliczenia pojemności retencyjnej. Przykładowo, objętość zbiorników niezbędna do zatrzymania całego opadu z okresu spoczynku roślin, kiedy system nawadniający nie jest wykorzystywany, wynosi 9950 m³, natomiast objętość obliczona na podstawie natężenia opadu miarodajnego (około 60 mm) to jedynie około 2800 m³.

8. Zieleń Rynku Głównego w Krakowie jako szczególny przypadek infrastruktury zielonej miasta i jej rola w kształtowaniu bioklimatu i klimatu lokalnego

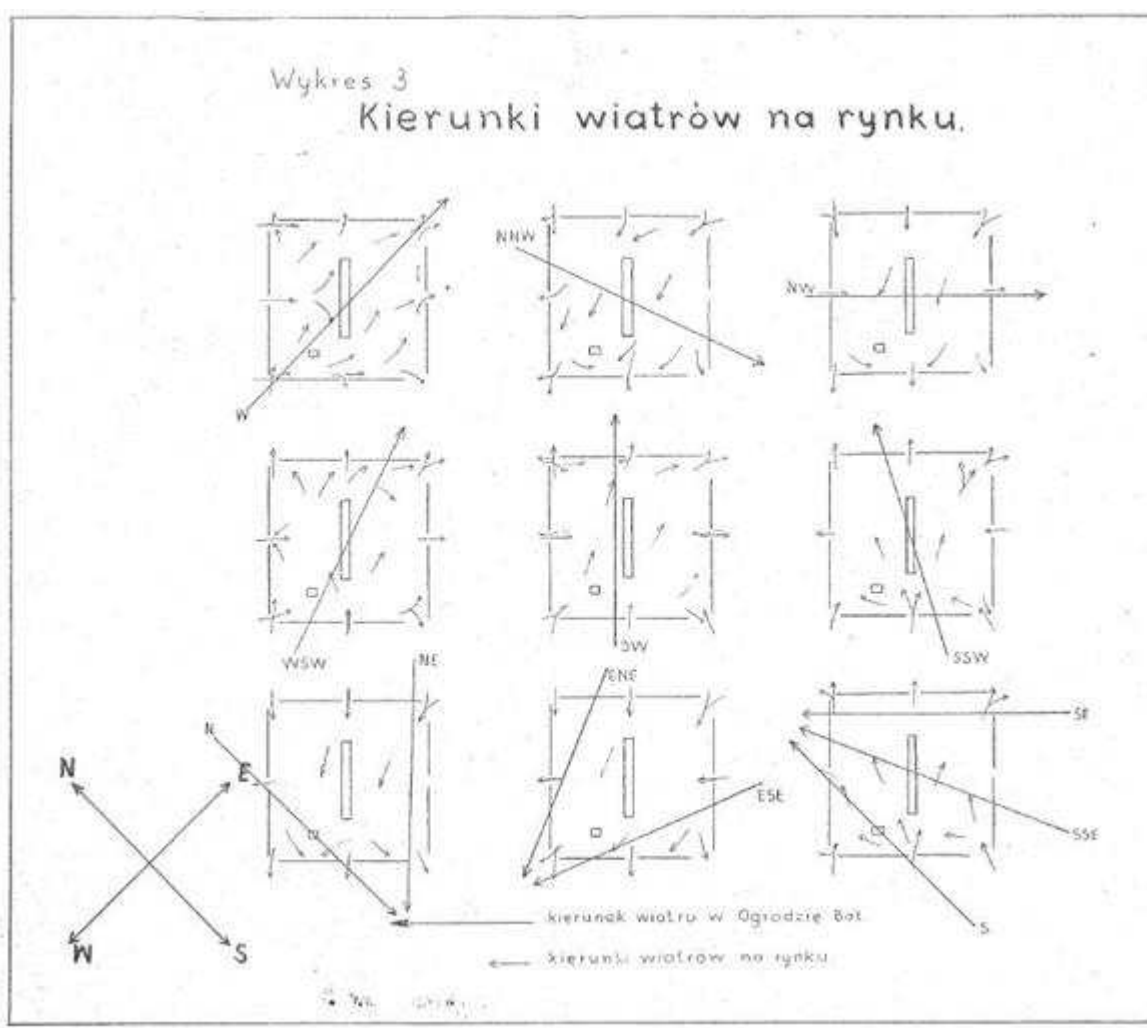
W 1966 r. została wykonana w Instytucie Geografii UJ (obecnie: Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ) praca magisterska pt. „Mikroklimat Rynku Krakowskiego”. Autorem był Jerzy Koperski, a praca powstała pod kierunkiem Prof. dr hab. M. Klimaszewskiego i Doc. M. Hessa. Mimo upływu lat praca nie straciła na aktualności, gdyż dokumentuje ona zróżnicowanie przestrzenne warunków mikroklimatycznych Rynku, a sam Rynek, jego zabudowa itp. nie uległy zmianom od tamtego czasu. W okresie 24.03.1965-4.04.1966 r. przeprowadzono 38 serii jednodniowych obserwacji w 3 terminach. Na Rynku zorganizowano 8 punktów pomiarowych, rozmieszczonych tak aby reprezentować różne fragmenty jego przestrzeni (ryc. 126). W każdym punkcie były wykonywane pomiary temperatury i wilgotności powietrza na wysokości 1,5 m nad powierzchnią ziemi w terminach 6:40, 12:40 i 20:40. Ponadto wyznaczano prędkość i kierunek wiatru, określano zachmurzenie, notowano czy dane stanowisko pomiarowe w chwili pomiaru jest nasłonecznione czy w cieniu i czy nawierzchnia Rynku jest mokra czy sucha. Wyniki pomiarów na Rynku porównano

z pomiarami wykonanymi w tym samym czasie w Ogrodzie Botanicznym na stacji klimatologicznej. Temperatura powietrza na Rynku wykazuje największe zróżnicowanie latem, w dniach z małym zachmurzeniem, w godzinach południowych i największa zanotowana wartość różnicy między punktami pomiarowymi wyniosła 2,2°C. Najniższe temperatury notowano na stanowiskach 1,2 i 3 znajdujących się w czasie pomiarów w cieniu, a najwyższe w punktach 4 i 5, znajdujące się w słońcu i blisko budynków. Na stanowisku nr 8, z drzewami, temperatura była o ok. 0,8°C wyższa niż w punkcie 7. Różnica między najwyższą temperaturą zanotowaną na Rynku a temperaturą w Ogrodzie Botanicznym wyniosła 2,3°C. Różnice wilgotności względnej między punktami na Rynku i między Rynkiem a Ogrodem Botanicznym nie przekraczały 10%. Kierunek i prędkość wiatru w poszczególnych punktach pomiarowych wykazywały dużą zmienność. Charakterystyczne były pulsacje prędkości i zawirowania wynikające z ruchów turbulentnych powietrza. Na stanowiskach 1 i 5 zanotowano największy udział ciszy atmosferycznej, czyli braku wiatru, zaś w punktach 3 i 6 prędkość wiatru często była większa niż w pozostałych punktach. Polanie płyty Rynku wodą powoduje, że temperatura powietrza osiąga wartości zbliżone do tych notowanych w Ogrodzie Botanicznym. Jednak w lecie w godzinach okołopołudniowych, przy małym zachmurzeniu, płyta Rynku wysycha po ok. 20 minutach i tylko częste ponowne polewanie płyty wodą mogłoby umożliwić obniżenie temperatury powietrza na dłuższy czas. Badania były prowadzone w różnych porach roku, jednak zawsze przy pogodzie bezchmurnej lub z małym zachmurzeniem i bezwietrznej lub ze słabym wiatrem temperatura powietrza na Rynku była o ok. 2°C wyższa niż w Ogrodzie Botanicznym.



Ryc. 126. Fragment planu Rynku Głównego w Krakowie zamieszczonego w pracy magisterskiej J. Koperskiego z 1966 r. z zaznaczonymi 8 punktami, w których były prowadzone pomiary mikroklimatyczne. Okręgi pokazują rozmieszczenie drzew.

Różnice temperatury między Rynkiem i Ogrodem Botanicznym w godzinach południowych były większe w dniach mroźnych niż latem, kiedy oscylowały wokół wartości 1°C . W godzinach południowych różnica temperatury powietrza między Rynkiem a Ogrodem Botanicznym zależy głównie od wielkości zachmurzenia (tzn. czym zachmurzenie mniejsze, tym różnice większe), natomiast wieczorem większą rolę odgrywa wiatr. Przy braku wiatru różnica wynosi ok 2°C , a przy prędkości wiatru równej lub powyżej 2 m/s nie przekracza 1°C . Różnice temperatury między punktami pomiarowymi na Rynku rano i wieczorem wynosiły średnio $0,6^{\circ}\text{C}$. Wieczorem najwyższe temperatury były notowane na stanowiskach położonych blisko budynków: 1 i 5, a najniższe temperatury były na stanowiskach położonych daleko od budynków i z lepszym przewietrzaniem: 3, 7 i 8.

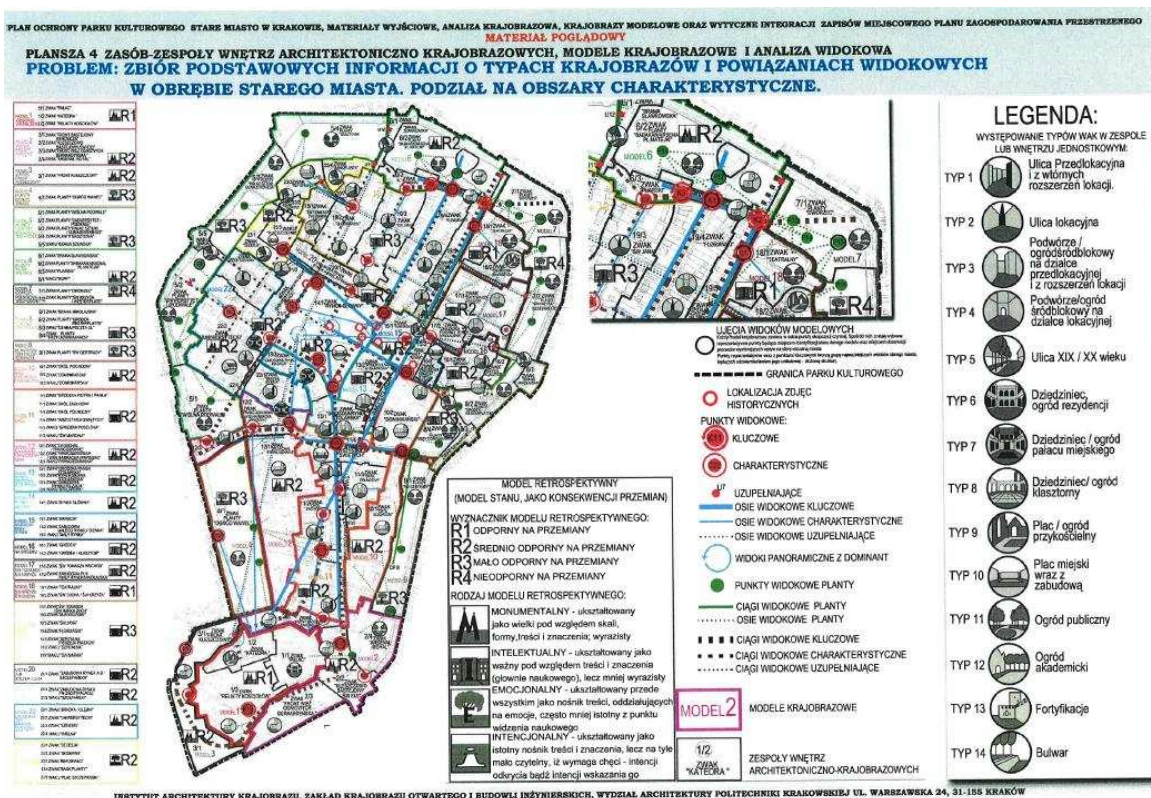


Ryc. 127. Modyfikacja kierunku wiatru na terenie Rynku Głównego w Krakowie w porównaniu z kierunkiem wiatru zmierzonym w Ogrodzie Botanicznym.

Pomiary kierunku i prędkości wiatru na Rynku Głównym pokazały, że zdarza się, że w Ogrodzie Botanicznym notowano wiatr a w tym samym czasie na Rynku obserwowano ciszę atmosferyczną. Ryc. 127 pokazuje modyfikacje kierunku wiatru na Rynku w porównaniu do kierunku zmierzonego w Ogrodzie Botanicznym. Kierunek wiatru określa skąd wiatr wieje i jest oznaczany wg róży wiatrów: N – wiatr północny (czyli wieje z północy na południe), S – wiatr południowy, W – wiatr zachodni, E – wiatr wschodni. Kierunki pośrednie to NE – wiatr północno-wschodni, SE – wiatr południowo-wschodni, SW – wiatr południowo-zachodni, NW – wiatr północno-zachodni. Wyróżnia się także kierunki dodatkowe, oznaczane trzyliterowo, np. między N i NE jest kierunek NNE, między NE i E – ENE, między E i SE – ESE itd. Przy wietrze notowanym w Ogrodzie jako wiejący z kierunków N, NE, ENE, ESE, NW i NNW, na Rynku wieje wiatr NE, czyli wieje z ul. Floriańskiej, Mikołajskiej, Jana i Sławkowskiej, czasem też z Siennej

i Szewskiej, a wpada w ulice Wiślną, Bracką, Grodzką, czasem Szewską, Sienną lub św. Anny. Gdy w Ogrodzie wiatr wieje z pozostałych kierunków to na Rynku wiatr wieje odwrotnie niż to opisano powyżej.

Z punktu widzenia krajobrazu kulturowego Rynek Główny w Krakowie jest przestrzenią wyjątkową i od 1978 roku jest wpisany na Listę Światowego Dziedzictwa UNESCO jako największy rynek Europy o średniowiecznym rodowodzie oraz miejsce o wyjątkowej wartości historycznej i kulturowej. W historii był użytkowany w różny sposób – zawsze jednak pozostawał punktem istotnym i centralnym dla funkcjonowania miasta: najpierw jako ośrodek administracji i handlu, miejsce doniosłych wydarzeń historycznych i kulturalnych, potem jako prestiżowy salon miasta i jedna z najważniejszych atrakcji turystycznych. Ze względu na swoją bogatą historię jest placem miejskim o znaczeniu symbolicznym w skali miasta, ale także miejscem o wyjątkowym nasyceniu reliktnymi archeologicznymi, które obecnie w części eksponowane są w podziemnej ekspozycji Muzeum Krakowa oraz terenem ze skomplikowaną infrastrukturą podziemną. Obszar Starego Miasta w Krakowie jest również Parkiem kulturowym – czyli zintegrowaną formą ochrony krajobrazu, która ustala reguły gospodarowania na tym obszarze (ryc. 128, 129).



Ryc. 128. Część graficzna Planu Ochrony Parku kulturowego Stare Miasto w Krakowie – plansza dotycząca zasobu, modeli krajobrazu i powiązań widokowych.

W historii Rynku Głównego był czas, w którym było na nim więcej zieleni, jednak od początku istnienia była to przestrzeń, w której zasadniczo nie występowało wiele okazów drzew, z uwagi na pełnione funkcje.

W 2021 roku do Budżetu Obywatelskiego Miasta Krakowa zgłoszony został projekt posadzenia na Rynku Głównym 30 drzew, aby zwiększyć zacienienie i przyczynić się do obniżenia temperatury w upalne dni. Jakkolwiek doniesienia naukowe wskazują, że nasadzenia drzew o rozłożystych koronach zmniejszają w czasie fal upałów temperaturę powierzchni wybrukowanych, to przestrzeń Rynku nie jest przykładem dowolnego placu miejskiego, na którym można posadzić drzewa kierując się jedynie logiką zapewnienia cienia na najbardziej nasłonecznionych powierzchniach. Ze względu na wyjątkową wartość tego miejsca istnieje szereg ograniczeń konserwatorskich, które warunkują jakiekolwiek przekształcenia tej przestrzeni – w tym sadzenie drzew. Do najważniejszych uwarunkowań, które ograniczają lokalizację nasadzeń należą:

- walory historyczne i relikty archeologiczne, które mogłyby zostać uszkodzone przez systemy korzeniowe drzew – w części eksponowane w podziemnym muzeum, w części obecne w innych częściach Rynku, takie jak podziemia dawnego ratusza, czy przedproża gotyckich kamienic i inne;
- skomplikowana infrastruktura podziemna (dawna i współczesna), która definiuje strefy wykluczeń określone w przepisach i która mogłaby zostać uszkodzona przez systemy korzeniowe;
- wartości estetyczne i kompozycyjne w skali wnętrza, pierzei Rynku oraz jego powiązań widokowych, które powinny zostać zachowane, a mogłyby być zaburzone przez przesłanianie widoków i obiektów koronami drzew. Określają je między innymi wytyczne wynikające z zapisów w „Planie ochrony Parku Kulturowego Stare Miasto w Krakowie”.

Ponieważ jednak zarówno dla władz miasta jak i dla Wojewódzkiego Konserwatora Zabytków zrozumiałe jest dążenie do zmniejszenia stresu cieplnego na Rynku Głównym, wydane zostały wytyczne określające warunki jakie powinien spełniać projekt nasadzeń drzew w tym miejscu (Ziaja 2024). W 2024 prowadził prace analityczno-projektowe interdyscyplinarny zespół specjalistów z Politechniki Krakowskiej (architektów, historyków architektury, architektów krajobrazu, archeologów, specjalistów z zakresu

dendrologii), który przygotował propozycję projektową spełniającą wymagania konserwatorskie i respektującą ograniczenia wynikające wyjątkowego zabytkowego statusu Rynku. Warto zauważyć, że konieczne było tutaj spełnienie najwyższych standardów, ponieważ naruszenie zasad ochrony miejsc Światowego Dziedzictwa UNESCO może wiązać się z utratą miejsca na Liście oraz prestiżu i wszelkich innych korzyści, które miasto czerpie z tego tytułu – zwłaszcza w zakresie przyciągania turystów zainteresowanych historią i kulturą Krakowa. Zastrzeżenie to nie jest bezpodstawne; Drewno zostało skreślone w czerwcu 2009 roku ze wspomnianej Listy UNESCO za naruszenie i zniszczenie uniwersalnych i wyjątkowych wartości, które były podstawą wpisu Doliny Łąby na tę Listę, przez budowę nowej przeprawy mostowej na obszarze objętym wpisem (UNESCO 2009).



Ryc. 129. Wycinek z Planu ochrony Parku Kulturowego Stare Miasto w Krakowie – zgodnie z analizami krajobrazowymi Rynek Główny to wnętrze o charakterze monumentalnym, średnio odporne na przemiany, ale jednocześnie będące obszarem, na którym leżą kluczowe i charakterystyczne punkty widokowe a także przecięte najistotniejszymi osiami i ciągami widokowymi dla obszaru całego Starego Miasta (oprac. A. Staniewska).

Z końcem 2024 roku przygotowane na Politechnice Krakowskiej opracowanie dotyczące realizacji zadania z Budżetu Obywatelskiego Miasta Krakowa „Posadźmy drzewa na Rynku Głównym” otrzymało pozytywne stanowisko Małopolskiego Wojewódzkiego Urzędu Ochrony Zabytków w Krakowie (Bobek i in. 2024). Wyznaczając możliwe miejsca dokonania nowych nasadzeń drzew wzięto pod uwagę uwarunkowania archeologiczno-architektoniczne (czyli to, gdzie obiektywnie można przewidzieć miejsca na drzewa tak, aby nie wchodziły w kolizję z obiektami architektonicznymi

i archeologicznymi), uwarunkowania i powiązania widokowe (aby zachować istniejące podlegające ochronie widoki) oraz uwarunkowania historyczne i współczesne dla doboru gatunków (czyli uwzględnienie gatunków drzew, które historycznie były w tej przestrzeni i dobór gatunków, które mają szanse na wzrost i przetrwanie w tych konkretnych warunkach).

Po dokonaniu wszelkich analiz wyznaczono pięć możliwych obszarów, w których można obecnie posadzić drzewa, które będą miały szansę wzrastać i przetrwać osiągając w dobrej kondycji swoje dojrzałe docelowe rozmiary:

1. Otoczenie kościoła Świętego Wojciecha;
2. Okolice Wieży Ratuszowej;
3. Sąsiedztwo fontanny;
4. Mogą zostać uzupełnione istniejące nasadzenia wzdłuż pierzei Rynku;
5. Nowy szpaler drzew wzdłuż zachodniej pierzei Rynku.

Proponowane gatunki obejmują zarówno już obecne w tej przestrzeni robinie białe (proponowana odmiana ‘Unifoliola’) oraz dęby (proponowany dąb szypułkowy w odpornej na warunki miejskie oraz o mniej ekspansywnych korzeniach odmianie ‘Monument’) a także rodzime odporne na suszę klony polne (w odmianie ‘Elsrijk’ o regularnej koronie). Do nasadzeń od wschodniej strony Sukiennic zaproponowano lipy: drobnolistną i srebrzystą w odmianach ‘Greenspire’ oraz ‘Brabant’ gdyż są odporne na warunki miejskie. W opracowaniu zwrócono uwagę na konieczność zapewnienia drzewom dobrych warunków wzrostu przez lepsze warunki glebowe, miejsce do rozrostu systemu korzeniowego, nawodnienie i pozostawienie koniecznego buforu wokół drzew.

9. Podsumowanie i wnioski

Celem opracowania było:

- wskazanie najpierw dla wybranych lokalizacji w Krakowie, reprezentujących najczęściej uczęszczane przez jego mieszkańców tereny, zasadności i możliwości wykonania nasadzeń nowych roślin lub modyfikacji istniejącej zieleni miejskiej,
- oszacowanie w kolejnym kroku możliwego wpływu takich inwestycji na poprawę warunków termicznych i biotermicznych, zwłaszcza w czasie fali upałów.

Wybrane lokalizacje, reprezentujące osiedla bloków mieszkalnych, place miejskie, duże i ruchliwe ulice i wielkie parkingi przed centrami handlowymi zostały opisane pod względem aktualnych cech środowiska przyrodniczego i zagospodarowania terenu, z punktu widzenia ich oddziaływania na klimat w skali lokalnej (NDVI, rzeźba terenu, udział powierzchniowy i wysokość roślinności, udział powierzchniowy i wysokość zabudowy). Wartości dla poszczególnych lokalizacji przedstawiono na tle rozkładu przestrzennego poszczególnych wskaźników na obszarze całego miasta oraz ich wartości średnich w poszczególnych dzielnicach. Analiza dostępnych danych wykazała, że problem niedostatecznej ilości obszarów zielonych w Krakowie nie jest zjawiskiem powszechnym, co nie znaczy, że nie występuje lokalnie. Niskie średnie wartości współczynnika NDVI cechują dzielnice w centrum Krakowa: Stare Miasto, a w mniejszym stopniu również: Grzegórzki, Prądnik Czerwony i Krowodrza. Istnieją obszary, w których dogęszczenie miejskiej zieleni przyniosłoby pozytywne skutki, niemniej jednak do każdego z takich obszarów trzeba podejść indywidualnie, w skali wykraczającej poza granice danego obszaru i w szerszym kontekście.

Wszystkie analizowane wskaźniki wykazują duże zróżnicowanie na terenie Krakowa oraz dla wybranych lokalizacji. Dla tych lokalizacji określono z jednej strony jakie są możliwości zmiany w udziale i rodzaju roślinności (biorąc pod uwagę np. znajdujące się tam zabytki itp.), a z drugiej strony – co jest tam zasadne np. z punktu widzenia warunków siedliskowych oraz co jest potrzebne i potencjalnie może polepszyć warunki termiczne i biotermiczne. Uwzględniono jakie funkcje ma pełnić dany obszar. Przestrzenie o silnej antropopresji takie jak rynki, place miejskie czy parkingi mają swoje miejsce i rolę w przestrzeni miasta na równi z parkami czy ogrodami. Nie znaczy to, że nie

należy na ich obszarze wdrażać rozwiązań z zakresu błękitno-zielonej infrastruktury, jeżeli jest to możliwe. Należy jednak pamiętać, że każdy obszar jest współzależny od sąsiadujących z nim. Faktycznie - użytkowanie odkrytego placu w centrum miasta, którego temperatura powierzchni jest wyższa niż otoczenia, a który pełni rolę m.in. miejsca organizacji różnych wydarzeń i imprez miejskich, takich jak koncerty, jarmarki itp. - może być w dni upalne problemowe. Wyzwaniem jest taka organizacja przestrzeni, która zminimalizuje uciążliwości dla użytkowników szanując jednocześnie tożsamość miejsca, wartości zabytkowe i historyczne widoki – co jest kluczowe zwłaszcza w kontekście placów historycznych, które w przeszłości nie były zielone, a obecnie istnieje potrzeba zapewniania na nich cienia. Możliwym rozwiązaniem jest zapewnienie takiego sąsiedztwa wokół danego obszaru, które pozwoli na zrekompensowanie wad wynikających z takiego a nie innego zagospodarowania przestrzennego w tym miejscu: dostateczna ilość miejsc zacienionych, odpowiednia ilość roślinności, szczególnie wysokiej. Należy pamiętać również, że zbyt gęste nasadzenia drzew mogą skutkować pogorszeniem naturalnych warunków przewietrzania, a w następstwie tego prowadzić np. do zwiększenia liczby i intensywności nocy tropikalnych czy pogorszenia jakości powietrza.

Z punktu widzenia rozpatrywania konfliktów między potrzebą wprowadzania zieleni a wartościami zabytkowymi wszystkie pozostałe typy lokalizacji nie nastręczają takich trudności. Najwięcej możliwości oferują tereny parkingów przy sklepach wielkopowierzchniowych jako tereny na wskroś współczesne, jednak przy koniecznych modyfikacjach funkcjonalnych i w zakresie infrastruktury technicznej. Zachowanie funkcji parkingowej jest priorytetowe, ale zarazem oczywiste. W obszarach analizowanych osiedli mieszkaniowych możliwości są zróżnicowane w zależności od parametrów intensywności zabudowy oraz infrastruktury podziemnej (parkingi podziemne). Zagrożeniem dla już istniejącej intensywnej zieleni na osiedlach Podwawelskim i Szkolnym może być zbytne dogęszczanie zabudowy kosztem terenów zieleni. Z kolei w ciągach ulic ograniczeniem bywa infrastruktura podziemna i parametry drogi oraz konieczność zapewnienia niezbędnej widoczności kierowcom – tym niemniej wprowadzanie szpalerów drzew daje cień zarówno pieszym, jak i prowadzącym pojazdy.

Dążąc do poprawy klimatu lokalnego przez wprowadzanie zieleni należy również wziąć pod uwagę czy w danym miejscu spełnione są warunki do wzrostu roślin i w konsekwencji do powstania nowych terenów zielonych. Drzewa (również niektóre wysokie krzewy), które mają realny wpływ na obniżenie temperatury powietrza i odczuwalnej temperatury, w większości przypadków mają bogaty system korzeniowy, który wymaga

dużo miejsca w glebie. Ważnym aspektem jest również zapewnienie roślinom dostępu do wody, czy to poprzez drenaż czy system nawadniający. W ostatnich latach w związku z postępującą zmianą klimatu niezbędna jest również ochrona roślinności przed długotrwałą suszą albo, wręcz przeciwnie, nawałnymi deszczami powodującymi powodzie błyskawiczne. Problem ten jest szczególnie ważny w przypadku instalacji pozbawionych dostępu do naturalnego podłoża, np. zielonych dachów, roślin w donicach itp.

Wpływ proponowanych rozwiązań na warunki biotermiczne i lokalną, miejską retencję wody może być znaczący i przynieść liczne korzyści. Z punktu widzenia funkcjonowania organizmu człowieka i kształtowania się temperatury jego ciała, najistotniejsze w czasie fal upałów jest przebywanie w cieniu i zapewnienie sobie niewielkiego ruchu powietrza. Proponowane rozwiązania znacznie zwiększają zacienienie obszarów często uczęszczanych przez mieszkańców Krakowa i różnicują rodzaje podłoża wystawione na promieniowanie słoneczne. To sprzyja tworzeniu się różnic temperatury podłoża i temperatury powietrza znajdującego się nad danym podłożem. Różnice temperatury powietrza powodują różnice w jego gęstości i wymuszają poziomy ruch powietrza, czyli lekki wiatr. W tak zagospodarowanych miejscach mieszkańcy w czasie fal upałów nadal doświadczają bardzo wysokiej temperatury powietrza, ale są choć częściowo chronieni przez bezpośrednim promieniowaniem słonecznym, co znacząco poprawia warunki biotermiczne. W takich warunkach można liczyć na kilkustopniowe obniżenie wskaźnika PET, a to oznacza np. możliwość generowania warunków zaliczanych do niższej klasy obciążeń cieplnych (klasy te mają po 4-6 stopni PET). Tego rodzaju działania mają szczególne znaczenie zwłaszcza dla najbardziej narażonych na negatywne skutki stresu cieplnego grup użytkowników przestrzeni miejskiej, czyli osób starszych i dzieci. Rozwiązania dotyczące lokalnej retencji wody polepszają miejscowe warunki środowiskowe i zapewniają dostateczną ilość wody dla roślin, ponadto ewapotranspiracja i parowanie wody z powierzchni różnych zbiorników zużywają duże ilości energii co przyczynia się do miejscowego obniżenia temperatury powietrza. Natomiast nie należy liczyć na to, że zbiorniki te np. uchronią miasto przed zalaniem w czasie sytuacji powodziowej, gdyż ich pojemność i inne parametry na to nie pozwalają.

Inaczej przedstawia się wpływ proponowanych rozwiązań na warunki termiczne. Przegląd literatury fachowej krajowej i zagranicznej wskazał, że tereny zielone w mieście w niewielkim stopniu modyfikują temperaturę powietrza, a wpływ ten jest widoczny w warunkach bezchmurnych i bezwietrznych. Przy dużym zachmurzeniu dopływ

energii słonecznej jest bardzo ograniczony i różnice w temperaturze różnych powierzchni w mieście są niewielkie, a to skutkuje brakiem większych różnic w temperaturze powietrza na terenie miasta. Podobnie sytuacja wygląda w czasie występowania silnego, a nawet umiarkowanego wiatru, kiedy turbulencja powoduje intensywne mieszanie się powietrza i wyrównanie jego temperatury na terenie miasta. Wpływ terenu zielonego w mieście na obniżenie temperatury powietrza w letni, gorący dzień zależy od wielkości tego terenu zielonego, jego zwartości i rodzaju roślinności. Szczególnie ważną rolę w kształtowaniu komfortu termicznego pełni zieleń wysoka, która ogranicza ilość promieniowania docierającego do podłoża poprzez jego zacienienie, a ponadto eliminuje część zanieczyszczeń powietrza wskutek ich osiadania na liściach, korze itp. oraz zwiększa lokalną retencję wody ograniczając spływ powierzchniowy. Zazwyczaj różnica temperatury powietrza zawdzięczana obecności roślinności wynosi 1-2°C co jest wartością niewielką, zwłaszcza w czasie fal upałów, kiedy temperatura często znacznie przekracza 30°C. Nocą różnice mogą być większe, a właśnie w nocy intensywność miejskiej wyspy ciepła jest największa i jej obniżenie może pomóc w zmniejszeniu liczby tzw. nocy tropikalnych. Warto przypomnieć, że w naszej strefie klimatycznej fale upałów są powodowane przez napływ zwrotnikowych mas powietrza, a nie przez samą insolację, czyli promieniowanie słoneczne. Latem w czasie fal upałów dopływ energii słonecznej nakłada się na napływ zwrotnikowych mas powietrza, dodatkowo podnosząc temperaturę, ale jeśli dopływają do nas polarne lub arktyczne masy powietrza, to przy takiej samej insolacji fale upałów nie występują. Napływ mas powietrza jest zależny od wielkoskalowych procesów związanych z globalną cyrkulacją atmosferyczną, niezależnych od działań człowieka. Kolejna kwestia to oddziaływanie na temperaturę powietrza zabudowy miejskiej, które jest znacznie intensywniejsze niż oddziaływanie zieleni miejskiej, z powodu własności fizycznych materiałów budowlanych i ilości elementów struktury urbanistycznej w zestawieniu z ilością zieleni. Miasto z definicji jest relatywnie niewielkim obszarem o dużej intensywności zabudowy, dominującej w pokryciu/użytkowaniu terenu. Można zatem stwierdzić, że proponowane inwestycje w zieloną infrastrukturę mogą się przyczynić do nieznacznego i tylko miejscowego obniżenia temperatury powietrza w daytime części doby.

Ważne podkreślenia jest, że występowanie wysokiej temperatury powietrza w mieście i niedostatek przestrzeni zacienionych są zjawiskami występującymi okresowo. Zacienienie, pożądane w słoneczny dzień, nocą jest elementem wręcz szkodliwym, bo opóźnia wypromieniowanie ciepła z podłoża, opóźnia więc wychładzanie miasta i

przyczynia się do wzrostu intensywności miejskiej wyspy ciepła i zagrożenia wystąpieniem nocy tropikalnych. Dlatego w niniejszym opracowaniu przedstawiono także możliwości wykorzystania technicznych sposobów zacieniania przestrzeni miejskich. Są to rozwiązania, które nie ingerują w sposób trwały w krajobraz miejski, są montowane czy rozkładane wtedy i tam, gdzie są w danej chwili potrzebne, a potem można je łatwo zdemontować i użyć ponownie w razie potrzeby. Jest to z pewnością dobra alternatywa dla przestrzeni, gdzie zacienienie jest okresowo potrzebne, a urządzenie terenu zielonego jest niemożliwe.

W ostatnich latach termin betonozy był często potocznie używany, aby opisać niekorzystne zjawisko usuwania zieleni z eksponowanych placów publicznych i rynków miast w Polsce. warunki panujące w tych przestrzeniach w czasie fal upałów skutkują społeczną presją na stosowanie określonych rozwiązań z zakresu błękitno-zielonej infrastruktury. Jednak aby działania te rzeczywiście przynosiły oczekiwane pozytywne rezultaty powinny być stosowane w sposób systemowy i skoordynowany w większej skali w miejscach do tego odpowiednich. Na to zjawisko zwrócili uwagę m.in. autorzy opracowania zawierającego wnioski z przeglądu przypadków z kilku wybranych miast w Polsce zatytułowanego *Zieleń w centrach polskich miast. Stan, funkcje i wyzwania* (Warchalska-Troll, Pistelok 2023). Oprócz tego autorzy opracowania wskazali, że wiele miast boryka się z problemami w tym zakresie w wyniku m.in. rozproszenia odpowiedzialności za zieleni w strukturach urzędów, braku monitoringu zakończonych inwestycji oraz braku dostępu do systemowych, spójnych z wymogami standardów (a w niektórych przypadkach wiedzy o istnieniu takich standardów), a przede wszystkim – braku polityki rozwoju zieleni i planowania nasadzeń na szczeblach lokalnych. Zatem wszelkie inwestycje w obszarach miejskich powinny być poprzedzone analizą możliwych rozwiązań w danych warunkach środowiskowych konkretnego miasta, popartą fachowymi badaniami.

Warto podkreślić, że w Krakowie istnieje szereg dobrych podstaw do rozważań na temat możliwości wykorzystania i rozwoju terenów zieleni dla poprawy klimatu lokalnego w oparciu o dokumenty opisujące system zieleni w ujęciu całościowym uwzględniającym różnorakie uwarunkowania. Szczególne znaczenie w tym kontekście powinny mieć zwłaszcza “Kierunki rozwoju i zarządzania terenami zieleni w Krakowie na lata 2019-2030” (Kowalewska i in., 2019)⁴ wraz z załącznikami. Dokument ten wprawdzie nie stanowi aktu

⁴ Opracowanie jest załącznikiem do ZARZĄDZENIA Nr 2282/2019 PREZYDENTA MIASTA KRAKOWA z dnia 09.09.2019 r. w sprawie określenia kierunków rozwoju i zarządzania terenami zieleni w Krakowie na lata 2019 – 2030: <https://www.bip.krakow.pl/zarzadzenie/2019/2282/>

prawa miejscowego, ani też nie zmienia istniejących dokumentów planistycznych, ale ma “umożliwiać planowanie, przygotowanie i realizację inwestycji w terenach zieleni, z ich odpowiednim przyporządkowaniem funkcjonalnym i przestrzennym w ramach systemu terenów zieleni w Krakowie, stosownie do potrzeb społecznych i walorów przyrodniczo-krajobrazowych”. Istnieje zatem dla Krakowa dokument określający spójną, planową i długoterminową politykę rozwoju terenów zieleni, do którego warto się odnosić rozważając dalsze systemowe działania, które miałyby wdrażać rozwiązania oparte na przyrodzie w celu poprawy klimatu lokalnego. Jego zapisy mogą zostać uwzględnione w sporządzanym obecnie Planie Ogólnym, którego procedurę sporządzania rozpoczęto w dniu 17 stycznia 2024 r⁵.

⁵ Uchwała Rady Miasta Krakowa Nr CXXVI/3470/24 w sprawie przystąpienia do sporządzenia Planu Ogólnego Miasta Krakowa: https://www.bip.krakow.pl/?dok_id=167&sub=uchwala&query=id%3D27604%26typ%3Du (dostęp: 10.02.2025).

Literatura

- Adamowski D., Glixelli T., Paluch P., Zalewski J., 2017, Katalog zielono-niebieskiej infrastruktury. Część II. Wytyczne i rozwiązania, MWiK w Bydgoszczy and Arup; <https://www.mwik.bydgoszcz.pl/index.php/component/attachments/download/445>
- Akbari H., Kurn D.M., Bretz S.E., Hanford J., 1997, Peak power and cooling energy savings of shade trees. *Energy and Buildings*, 25, 139-148.
- Aram F., Higuera García E., Solgi E., Mansournia S., 2019, Urban green space cooling effect in cities, *Heliyon*, 5, 01339, DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e01339.
- Arsad FS, Hod R, Ahmad N, Ismail R, Mohamed N, Baharom M, Osman Y, Radi MFM, Tangang F., 2022, The Impact of Heatwaves on Mortality and Morbidity and the Associated Vulnerability Factors: A Systematic Review, *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 19(23):16356. <https://doi.org/10.3390/ijerph192316356>
- Bergier T., Kowalewska A. (red.), 2019, Błękitno-zielona infrastruktura dla łagodzenia zmian klimatu w miastach – katalog techniczny. Ecologic Institute i Fundacja Sendzimira; <https://sendzimir.org.pl/projekty/projekt-climate-nbs-polska/>
- Błażejczyk K., Broede P., Fiala D., Havenith G., Holmér I., Jendritzky G., Kampmann B., 2010, UTCI - nowy wskaźnik oceny obciążeń cieplnych człowieka, *Przegląd Geograficzny*, 82 (1): 49-71.
- Błażejczyk K., Kuchcik M., 2020, Znaczenie zieleni dla kształtowania klimatu miasta [w:] Red. Barbara Szulczewska, Anna Stankowska, Zieleń, woda, infrastruktura techniczna – bez granic, t. 1: O znaczeniu zieleni w miastach, Instytut Rozwoju Miast i Regionów, Warszawa-Kraków, 13-37. <https://ecomy.irmir.pl/wp-content/uploads/2021/08/Tom-I-O-znaczeniu-zieleni-w-miastach-13-01-22.pdf>
- Błażejczyk K., Kunert A., 2011, Bioklimatyczne uwarunkowania rekreacji i turystyki w Polsce, Monografie, 13, IGiPZ PAN, Warszawa.
- Błażejczyk K., & Twardosz, R., 2023, Secular changes (1826–2021) of human thermal stress according to UTCI in Kraków (southern Poland), *International Journal of Climatology*, 43, 9, 4220–4230, <https://doi.org/10.1002/joc.8083>
- Bobek W., Zachariasz A., Myczkowski Z., Kadłuczka A., Przygodzki D., Stala K., Forczek-Brataniec U., Greniuk A., Fabijanowska K., 2024, Opracowanie dotyczące realizacji zadania z Budżetu Obywatelskiego Miasta Krakowa „Posadźmy drzewa na Rynku Głównym”, maszynopis, Politechnika Krakowska, Kraków.
- Bokwa A., 1994. Bioklimatyczne aspekty turystyki w mieście. Zeszyty IGiPZ PAN. nr 24.
- Bokwa A., 2010, Wieloletnie zmiany struktury mezo klimatu miasta na przykładzie Krakowa, IGiPZ UJ, Kraków, ss. 258; https://pracownia-wydawnicza.geo.uj.edu.pl/documents/154599412/156588975/%21%21%21+2010+www_Bokwa_Wieloletnie+zminy.pdf/928630d3-14e4-4e48-bbfb-7ba8cc57daee
- Bokwa A., 2016, Klimat Krakowa. W: K. Bajorek-Zydroń, P. Wężyk(red.) Atlas pokrycia terenu i przewietrzania Krakowa. Urząd Miasta Krakowa, Kraków: 19.
- Bokwa A., Dobrovolný P., Gál T., Geletič J., Gulyas A., Hajto M. J., Holec J., Hollósi B., Kielar R., Lehnert M., Skarbit N., Šťastný P., Svec M., Unger J., Walawender J. P., Žuvela-Aloise M., 2018a, Urban climate in Central European cities and global climate change, *Acta Climatologica*, 51-52, 7-35; DOI: <https://doi.org/10.14232/acta.clim.2018.52.1>
- Bokwa A., Geletič J., Lehnert M., Žuvela-Aloise M., Hollósi B., Gál T., Skarbit N., Dobrovolný P., Hajto M.J., Kielar R., Walawender J.P., Šťastný P., Holec J., Ostapowicz K., Burianová J., Garaj M., 2019, Heat load assessment in Central European cities using an urban climate model and observational monitoring data. *Energy and Buildings*, 201: 53-69, DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.07.023

- Bokwa A., Hajto M.J., Walawender J.P., Szymanowski M., 2015, Influence of diversified relief on the urban heat island in the city of Kraków, Poland, *Theoretical and Applied Climatology*, 122, 365–382.
- Bokwa A., Limanówka D., 2008, Mezoskalowe zróżnicowanie temperatury powietrza i opadów atmosferycznych w dolinie Wisły w Krakowie i okolicy (1991–2005). *Wiadomości Meteorologii, Hydrologii, Gospodarki Wodnej*, 3–4: 3–20.
- Bokwa A., Limanówka D., 2014, Effect of relief and land use on heat stress in Kraków, Poland, *DIE ERDE – Journal of the Geographical Society of Berlin*, 145(1-2), 34–48; DOI: <https://doi.org/10.12854/erde-145-4>
- Bokwa A., Skowera B., 2008, Wpływ rzeźby i użytkowania terenu na strukturę opadów atmosferycznych w okolicach Krakowa (1971–2005). *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 5: 51–61, publikacja dostępna na stronie: http://www.infraeco.pl/pl/art/a_15230.htm
- Bokwa A., Wypych A., Hajto M.J., 2018b, Role of Fog in Urban Heat Island Modification in Kraków, Poland. *Aerosol and Air Quality Research*, 18: 178–187, doi: 10.4209/aaqr.2016.12.0581
- Bowler D.E., Buyung-Ali L., Knight T.M., Pullin A.S., 2010, Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence, *Landscape and Urban Planning*, 97, 147–155, DOI:10.1016/j.landurbplan.2010.05.006.
- Czerwieniec M., Lewińska J., 2000, *Zieleń w mieście*, Instytut Gospodarki Przestrzennej i Komunalnej, Wydanie drugie, Warszawa.
- de Freitas C.R., Grigorieva E.A., 2015, A comprehensive catalogue and classification of human thermal climate indices, *Int J Biometeorol*, 59:109–120, DOI 10.1007/s00484-014-0819-3
- Degórski M., Affek A., Degórska B., Kowalska A., Regulaska E., Wolski J., Solon, J., 2022, Identyfikacja znaczących interakcji między usługami ekosystemowymi oraz istotnych zestawów usług na przykładzie podtypów ekosystemów miejskich Warszawy. Raport sporządzony dla Koordynatora Projektu – Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu. Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania im. S. Leszczyckiego PAN, Warszawa, online: https://www.igipz.pan.pl/tl_files/igipz/ZGiK/projekty/ecoserv/Raport_5.pdf
- Dynakowska M., Iskra K., Jaczevska A., Marcinkowski M., Rakoczy A., Romańczak A., Różyński G., Rymśa B., Sadowski M., Syrzycki M., Szczesiak T., 2023, Katalog dobrych praktyk adaptacyjnych, Instytut Ochrony Środowiska – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa, online: <https://klimada2.ios.gov.pl/files/2024/Katalog%20dobrych%20praktyk%20adaptacyjnych.pdf>
- Egerházi L., Kántor N., 2011, Area usage of two outdoor public places with regard to the thermal conditions – observation-based human thermal comfort study in the centre of Szeged, *Acta climatologica et chorologica, Universitatis Szegediensis*, 44-45, 73-81.
- Ekspertyza Miejskiej Wyspy Ciepła w Krakowie, 2023, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego, Urząd Miasta Krakowa, Wydział Geodezji, Referat ds. Miejskiego Systemu Informacji Przestrzennej, Kraków, ss. 122; https://www.krakow.pl/aktualnosci/273733,2163,komunikat,miejska_wyspa_ciepła_w_krakowie.html
- Geletic J., Lehnert M., Resler J., Krc P., Middel A., Krayenhoff E.S., Krüger E., 2022, High-fidelity simulation of the effects of street trees, green roofs and green walls on the distribution of thermal exposure in Prague-Dejvice, *Building and Environment*, 223, 109484, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109484>
- Hess T. M., Niedźwiedz T., Obrębska-Starkłowa B., 1989: *Bioklimat Krakowa*. *Prace Geograficzne* 73, *Prace Instytutu Geograficznego UJ*, 95, 7–57.

- Hirons, A. Sjöman H., 2019, Tree Species Selection for Green Infrastructure: A Guide for Specifiers. The Trees and Design Action Group (TDAG), Issue 1.3/2019, online: https://www.tdag.org.uk/uploads/4/2/8/0/4280686/tdag_speciesguidev1.3pdf.pdf
- Hirschfeld D., Guenther A., 2024, Landscape Architecture Solutions to Extreme Heat: Research Study. American Society of Landscape Architects Fund (ASLA Fund). <https://www.asla.org/evidence>
- Höppe P., 1999, The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, 43, 71-75.
- IPCC (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers, publikacja dostępna na stronie: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf
- Jamei E., Thirunavukkarasu G., Chau H. W., Seyedmahmoudian M., Stojcevski A., Mekhilef S., 2023, Investigating the cooling effect of a green roof in Melbourne. *Building and Environment*, 246, 110965. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110965>
- Knight T., Price S., Bowler D., Hookway A., King S., Konno K., Richter R.L., 2021, How effective is 'greening' of urban areas in reducing human exposure to ground-level ozone concentrations, UV exposure and the 'urban heat island effect'? An updated systematic review. *Environ Evid*, 10, 12, <https://doi.org/10.1186/s13750-021-00226-y>
- Komunikat 05/2024 Komitetu Problemowego ds. Kryzysu Klimatycznego przy Prezydium PAN na temat odpowiedzi na wyzwania klimatyczne z perspektywy lokalnych polityk przestrzennych. Online: <https://pan.pl/wp-content/uploads/2024/07/Komunikat-planowanie-przestrzenne-10.07.pdf>
- Kondracki J., 2000, *Geografia regionalna Polski*, PWN, Warszawa.
- Koperski J., 1966, *Mikroklimat Rynku Krakowskiego*, praca magisterska, maszynopis w archiwum Zakładu Klimatologii Instytutu Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie.
- Kowalewska A., Sawczak M., Szynal P., Zachariasz A., Muras P., Bergier T., Mydlowski M., i in., 2019, "Kierunki rozwoju i zarządzania terenami zieleni w Krakowie na lata 2019-2030", Załącznik do Zarządzenia nr 2282 Prezydenta Miasta Krakowa z dnia 29 września 2019 r., <https://zsm.krakow.pl/kritz.html> (dostęp: 24.01.2024).
- Kowalski P., 2014, Green infrastructure as a multifunctional tool for shaping cities of the future / Zielona Infrastruktura jako wielofunkcyjne narzędzie kształtowania miast przyszłości [w:] *Czasopismo Techniczne / Technical Transactions seria Architektura*, nr 458, vol. 8. Kraków, s. 98-113.
- Kozłowska-Szczęśna T., Krawczyk B., Kuchcik M., 2004, Wpływ środowiska atmosferycznego na zdrowie i samopoczucie człowieka, *Monografie 4, IGiPZ PAN Warszawa*, ss. 194. <https://rcin.org.pl/igipz/dlibra/publication/13509/edition/2444/content>
- Ladd K., Meerow S., 2022, Planning for Urban Heat Resilience. Planning Advisory Services (PAS) Report 600. American Planning Association. <http://www.planning.org/publications/report/9245695/>
- Leszczyński P., Markiewicz J., Mądry T., Mierzejewski M., Ogórek S., Rybacki J., 2023, Wpływ zmian klimatu na gospodarkę Polski na przykładzie wybranych miast wojewódzkich, Working Paper, nr 4, Polski Instytut Ekonomiczny, Warszawa
- Lewińska J., 1967, Opady atmosferyczne w Wielkim Krakowie, *Prace PIHM*, 91, 19–28.
- Lewińska J., Bartosik J., Baścik J., Czerwieniec M., Zgud K., 1982, Wpływ miasta na klimat lokalny (na przykładzie aglomeracji krakowskiej), *Inst. Kształt. Środ.*, Warszawa.
- Lewińska J., Zgud K., Baścik J., Wiatrak W., 1990, *Klimat obszarów zurbanizowanych*, Inst. Gosp. Przestrz. i Komun., Warszawa.

- Limanówka D., 1991, Ekstremalne warunki bioklimatyczne w rejonie Krakowa. *Acta Univ. Wratisl.*, 1213, 309–313.
- Luo M., Wu S., Lau G.N.-C., Pe, T., Liu Z., Wang X., Ning G., Chan T.O., Yang Y., Zhang W., 2024, Anthropogenic forcing has increased the risk of longer-traveling and slower-moving large contiguous heatwaves. *Science Advances*, 10, 13, <https://doi.org/10.1126/sciadv.adl1598>
- Matuszko A., Mikołajczyk D., Matuszko D., 2023, Zmiany klimatu Krakowa i adaptacja do nich w kontekście uwarunkowań planistycznych, *Prace Geograficzne, IGiGP UJ*, 170, 99-118.
- Matzarakis, A. and Fröhlich, D. (2018). Influence of urban green on human thermal bioclimate - application of thermal indices and micro-scale models. *Acta Hort.* 1215, 1-10 DOI: 10.17660/ActaHortic.2018.1215.1
- Mroczka A., 1992, Zróżnicowanie czasowe i przestrzenne wybranych wskaźników biometeorologicznych na terenie Krakowa, *Rocznik Naukowy AWF*, 25, Kraków.
- Mroczka A., 1996, Bioklimat Krakowa w aspekcie turystyczno-rekreacyjnym, *Rocznik Naukowo-Dydaktyczny WSP w Krakowie, Prace Geograficzne XVI*, 184, 51-58.
- Niedźwiedz T., Obrębska-Starkłowa B., Limanówka D., Mroczka A., Ustrnul Z., 1994-1995, Zmienność bioklimatu Krakowa, *Folia Geographica, ser. Geographica-Physica*, 26-27, 89-105.
- Rahman M. A., Hartmann C., Moser-Reischl A., von Strachwitz M. F., Paeth H., Pretzsch H., Pauleit S., Rötzer T., 2020, Tree cooling effects and human thermal comfort under contrasting species and sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 287, 107947, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.107947>
- Reinwald, F., Brandenburg, C., Gabor, A., Hinterköerner, P., Kainz, A., Kraus, F., Ring, Z., Scharf, B., Tötzer, T., & Damyanovic, D. (2021). Multi-Level Toolset for Steering Urban Green Infrastructure to Support the Development of Climate-Proofed Cities. *Sustainability*, 13(21), 12111. <https://doi.org/10.3390/su132112111>
- Roman L.A., Tenley M. Conway, T.S. Eisenman A.K. Koeser C. Ordóñez Barona D. H. Locke, 2020, Beyond ‘Trees Are Good’: Disservices, Management Costs, and Tradeoffs in Urban Forestry. *Ambio* 50: 615–30. <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01396-8>
- Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W., 1973a, Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS (Earth Resources Technology Satellite). *Proceedings of 3rd Earth Resources Technology Satellite Symposium, Greenbelt*, 10-14 December, SP-351, 309-317.
- Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W., Harlan J.C., 1973b, Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation, *Remote Sensing Center, Texas A&M University*, ss. 390, <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19750020419/downloads/19750020419.pdf>
- Schwaab J., Meier R., Mussetti G. Seneviratne S., Bürgi C., Davin E.L., 2021, The role of urban trees in reducing land surface temperatures in European cities. *Nat Commun*, 12, 6763 <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26768-w>
- Schwarz N., Bauer A., Haase D., 2011, Assessing climate impacts of planning policies – An estimation for the urban region of Leipzig (Germany). *Environmental Impact Assessment Review* 31: 97-111.
- Sekula P., Bokwa A., Ustrnul Z., Zimnoch M., Bochenek B. (2021). The impact of a foehn wind on PM10 concentrations and the urban boundary layer in complex terrain: a case study from Kraków, Poland. *Tellus B: Chemical and physical meteorology*, 73: 1933780, <https://doi.org/10.1080/16000889.2021.1933780>
- Solon J., Borzyszkowski J., Bidłasik M., Richling A., Badora K., Balon J., Brzezińska-Wójcik T., Chabudziński Ł., Dobrowolski R., Grzegorzczak I., Jodłowski M., Kistowski M., Kot R., Krąż P., Lechnio J., Macias A., Majchrowska A., Malinowska E., Migoń P., Myga-Piątek

- U., Nita J., Papińska E., Rodzik J., Strzyż M., Terpiłowski S., Ziaja W., 2018, Physico-geographical mesoregions of Poland: Verification and adjustment of boundaries on the basis of contemporary spatial data, *Geographia Polonica*, 91, 2, 143-170, doi: <https://doi.org/10.7163/GPol.0115>
- Souch, C.A., Souch, C., 1993, The effect of trees on summertime below canopy urban climates: a case study, Bloomington, Indiana. *J. Arboric.* 19(5):303-312.
- Spanjar G., Bartlett D., Schramkó S., Kluck J., van Zandbrink L., Föllmi D., 2023, Cool Towns Intervention Catalogue: Proven solutions to mitigate heat stress at street-level. CoE City Net Zero, Faculty of Technology, Amsterdam University of Applied Sciences.
- Su M., Jie P., Li P., Yang F., Huang Z., Shi X., 2024, A review on the mechanisms behind thermal effect of building vertical greenery systems (VGS): methodology, performance and impact factors. *Energy and Buildings*, 303, 113785. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113785>
- Tabassum S., Beaumont L.J., Shabani F., Staas L., Griffiths G., Ossola A., Leishman M.R., 2023, Which Plant Where: A Plant Selection Tool for Changing Urban Climates. *Arboriculture & Urban Forestry*, 49, 4, 190–210. <https://doi.org/10.48044/jauf.2023.014>
- Taha H, Akbari H, Rosenfeld A, 1991, Heat island and oasis effects of vegetative canopies: micro meteorological field measurements, *Theoretical and Applied Climatology*, 44, p. 123.
- Teixeira C.P., Fernandes C.O., Ahern J., 2022, Adaptive planting design and management framework for urban climate change adaptation and mitigation. *Urban Forestry & Urban Greening*, 70, 127548, <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127548>
- UNESCO, 2009, “Dresden is deleted from UNESCO’s World Heritage List”, komunikat na stronie Miejsc Światowego Dziedzictwa UNESCO (UNESCO World Heritage Sites), z dnia 25 czerwca 2009 roku: <https://whc.unesco.org/en/news/522> (dostęp: 2.10.2024).
- U.S. Environmental Protection Agency, 2008, Trees and Vegetation. In: *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies*. https://www.epa.gov/sites/default/files/2017-05/documents/reducing_urban_heat_islands_ch_2.pdf
- U.S. Environmental Protection Agency, 2012, Cool Pavements. In: *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies*. https://www.epa.gov/sites/default/files/2017-05/documents/reducing_urban_heat_islands_ch_5.pdf
- Wang J., Rich P. M., Price K. P., 2003, Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plains, *USA*, *International Journal of Remote Sensing*, 24, 11, 2345-2364.
- Wang Q., Tenhunen J., Quoc Dinh N., Reichstein M., Vesala T., Keronen P., 2004, Similarities in ground- and satellite-based NDVI time series and their relationship to physiological activity of a Scots pine forest in Finland, *Remote Sensing of Environment*, 93, 1–2, 225-237, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.07.006>
- Warchalska-Troll A., Pistelok P. (red.), 2023, Zieleń w centrach polskich miast. Stan, funkcje i wyzwania, *Badania Obserwatorium Polityki Miejskiej*, Instytut Rozwoju Miast i Regionów, Warszawa–Kraków, <https://doi.org/10.51733/opm.2023.11>
- Wieczorek J., Bochenek B., Strzyżewski T., Hajto M.J., Sekuła P., Bokwa A., Zimnoch M., 2024 Daily heat stress in Kraków in the warm period 2012–2022 based on hourly meteorological measurements and radiative fluxes derived from satellite systems, *Acta Geographica Lodziensia*, 117, 121-133, <https://doi.org/10.26485/AGL/2024/117/9>
- Winbourne J.B., Jones T.S., Garvey S.M., Harrison J.L., Wang L., Li D., Templer P.H., Hutryra L.R., 2020, Tree Transpiration and Urban Temperatures: Current Understanding, Implications, and Future Research Directions. *BioScience*, 70, 7, 576–588, <https://doi.org/10.1093/biosci/biaa055>
- Wiśniewski M., 2015, *Witold Cęckiewicz, Tom I. Rozmowy o architekturze*, red. Marta Karpińska, Dorota Leśniak-Rychlak, Michał Wiśniewski, Instytut Architektury, Kraków, s. 172-173.

- Wrona K., 2022, Wpływ różnych rodzajów zieleni miejskiej na warunki termiczne i wilgotnościowe w Krakowie, praca magisterska, maszynopis w archiwum Zakładu Klimatologii Instytutu Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków, ss. 182.
- Wstępne opracowanie warunków anemologicznych Krakowa w kontekście modyfikacji naturalnego przewietrzania miasta przez zabudowę, 2019, Uniwersytet Jagielloński, Wydział Geografii i Geologii, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, Katedra Zastosowań Fizyki Jądrowej, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy, Kraków, manuskrypt niepublikowany wykonany na zlecenie Urzędu Miasta Krakowa, ss. 55.
- Wypych A., 2007, Wilgotność powietrza. W: Klimat Krakowa w XX wieku. Matuszko D. (red.), Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków, s. 113–125.
- Yoshino M.M., 1975, Climate in a small area, Univ. of Tokyo Press, Tokyo.
- Zare S., Hasheminejad N., Shirvan H.E., Hemmatjo R., Sarebanzadeh K., Ahmadi S., 2018, Comparing Universal Thermal Climate Index (UTCI) with selected thermal indices/environmental parameters during 12 months of the year, Weather and Climate Extremes, 19, 49-57, DOI: 10.1016/j.wace.2018.01.004
- Ziaja B., 2024, „Jest zielone światło dla posadzenia drzew na Rynku Głównym w Krakowie”, komunikat w serwisie Radia Kraków z dnia 3 stycznia 2024: <https://www.radiokrakow.pl/aktualnosci/krakow/jest-zielone-swiatlo-dla-posadzenia-drzew-na-ryнку-glównym-w-krakowie/> (dostęp: 2.10.2024).

ZAŁĄCZNIKI

(patrz osobny plik)