



**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE**

**WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI,  
INFORMATYKI I INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ**

KATEDRA INFORMATYKI STOSOWANEJ

**Praca dyplomowa magisterska**

*Aplikacja internetowa wyznaczająca ograniczenia prędkości na drogach  
na podstawie danych z OpenStreetMap*  
*Web application that determines speed limits on roads based on data  
from OpenStreetMap*

Autor:

*Piotr Jaromin*

Kierunek studiów:

*Informatyka*

Opiekun pracy:

*dr inż. Grzegorz Rogus*

Kraków, 2018

*Uprzedzony o odpowiedzialności karnej na podstawie art. 115 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (t.j. Dz.U. z 2006 r. Nr 90, poz. 631 z późn. zm.): „Kto przywłaszcza sobie autorstwo albo wprowadza w błąd co do autorstwa całości lub części cudzego utworu albo artystycznego wykonania, podlega grzywnie, karze ograniczenia wolności albo pozbawienia wolności do lat 3. Tej samej karze podlega, kto rozpozna bez podania nazwiska lub pseudonimu twórcy cudzy utwór w wersji oryginalnej albo w postaci opracowania, artystycznego wykonania albo publicznie zniekształca taki utwór, artystyczne wykonanie, fonogram, videogram lub nadanie.”, a także uprzedzony o odpowiedzialności dyscyplinarnej na podstawie art. 211 ust. 1 ustawy z dnia 27 lipca 2005 r. Prawo o szkolnictwie wyższym (t.j. Dz. U. z 2012 r. poz. 572, z późn. zm.): „Za naruszenie przepisów obowiązujących w uczelni oraz za czyny uchybiające godności studenta student ponosi odpowiedzialność dyscyplinarną przed komisją dyscyplinarną albo przed sądem koleżeńskim samorządu studenckiego, zwanym dalej «sądem koleżeńskim».”, oświadczam, że niniejszą pracę dyplomową wykonałem(-am) osobiście i samodzielnie i że nie korzystałem(-am) ze źródeł innych niż wymienione w pracy.*

*Serdecznie dziękuję moim rodzicom za umożliwienie mi studiowania, oraz promotorowi za udzielenie istotnych wskazówek.*



# **Spis treści**

<b>1. Wprowadzenie .....</b>	9
1.1. Wstęp.....	9
1.2. Cele pracy .....	10
1.3. Wykorzystane technologie.....	12
1.4. Przegląd literatury.....	13
1.5. Układ pracy.....	16
<b>2. Koncepcja i projekt systemu .....</b>	17
2.1. Ogólny opis systemu .....	17
2.1.1. Cele .....	17
2.1.2. Udziałowcy i użytkownicy .....	17
2.1.3. Granice systemu (wejścia, wyjścia) .....	17
2.1.4. Podstawowe cele udziałowców i użytkowników .....	18
2.1.5. Lista możliwości .....	18
2.1.6. Diagram klas .....	19
2.2. Opis klas aplikacji .....	19
2.2.1. CalculationOperations.....	20
2.2.2. components .....	20
2.2.3. layerManagers.....	20
2.2.4. mapObjects.....	20
2.2.5. models .....	20
2.2.6. services.....	20
2.3. Architektura systemu.....	20
<b>3. Algorytm - opracowanie teoretyczne.....</b>	23
3.1. Ogólny zarys algorytmu .....	23
3.2. Przyporządkowanie obiektów reprezentowanych przez punkty, do poszczególnych dróg ...	24
3.3. Wyznaczanie współrzędnych punktu znajdującego się na drodze, odległego o n metrów od innego punktu .....	25

3.4.	Wyznaczanie minimalnego obszaru pokrywającego .....	27
3.5.	Powiększanie wyznaczonego obszaru pokrywającego.....	29
3.6.	Łączanie powiększonych obszarów pokrywających .....	30
3.6.1.	Łączanie powiększonych obszarów pokrywających w przypadku gdy jeden ob- szar w całości znajduje się w drugim.....	30
3.6.2.	Łączanie powiększonych obszarów pokrywających w przypadku gdy jeden ob- szar nachodzi w całości tylko jednym bokiem .....	32
3.6.3.	Łączanie powiększonych obszarów pokrywających w przypadku gdy jeden ob- szar nachodzi tylko jednym rogiem .....	35
3.7.	Znajdowanie punktów przecięcia drogi i powiększonego obszaru .....	37
3.8.	Sprawdzanie, czy punkt przecięcia należy do odcinka.....	38
3.9.	Przyporządkowanie obiektów reprezentowanych przez wielokąty, do poszczególnych dróg	39
3.10.	Obliczanie, po której stronie drogi znajduje się konkretny punkt .....	41
3.11.	Wyznaczanie promienia skrętu dla zakrętów danej drogi .....	42
<b>4.</b>	<b>Algorytm - poszczególne składowe oraz przykłady zastosowania.....</b>	<b>43</b>
4.1.	Typ nawierzchni.....	43
4.2.	Przejścia dla pieszych.....	45
4.2.1.	Przyporządkowywanie przejść dla pieszych do poszczególnych dróg .....	45
4.2.2.	Wyznaczanie prędkości i umieszczenie jej w odpowiednim miejscu na mapie .....	46
4.3.	Przystanki autobusowe i tramwajowe.....	47
4.3.1.	Wyznaczanie prędkości i umieszczenie jej w odpowiednim miejscu na mapie .....	48
4.4.	Przejazdy kolejowe .....	49
4.4.1.	Przyporządkowywanie przejazdów kolejowych do poszczególnych dróg .....	49
4.4.2.	Wyznaczanie prędkości i umieszczenie jej w odpowiednim miejscu na mapie .....	50
4.5.	Szkoły i miejsca zabaw.....	51
4.5.1.	Wyznaczanie prędkości i umieszczenie jej w odpowiednim miejscu na mapie .....	52
4.6.	Sygnalizacja świetlna .....	53
4.6.1.	Przyporządkowywanie sygnalizacji świetlnej do poszczególnych dróg .....	53
4.6.2.	Wyznaczanie prędkości i umieszczenie jej w odpowiednim miejscu na mapie .....	54
4.7.	Sklepy i miejsca kultów religijnych .....	55
4.7.1.	Wyznaczanie prędkości i umieszczenie jej w odpowiednim miejscu na mapie .....	56
4.8.	Liczba pasów ruchu .....	57
4.9.	Rodzaj drogi .....	59
4.10.	Zakręty.....	60
4.10.1.	Wyznaczanie prędkości i umieszczenie jej w odpowiednim miejscu na mapie .....	61

4.11. Działanie algorytmu .....	62
<b>5. Interfejs użytkownika .....</b>	<b>65</b>
5.1. Widok główny aplikacji.....	65
5.2. Menu wyboru warstw .....	67
5.3. Widok zaznaczonych ulic .....	69
5.4. Dodawanie własnych obiektów .....	70
5.4.1. Dodawanie obiektów reprezentowanych przez pojedynczy punkt .....	71
5.4.2. Dodawanie obiektów reprezentowanych przez zbiór punktów.....	71
<b>6. Wnioski .....</b>	<b>73</b>



# **1. Wprowadzenie**

## **1.1. Wstęp**

Bezpieczeństwo na drodze stanowi jedno z podstawowych celów stawianych zarówno przez budowniczych dróg, producentów samochodów ich użytkowników a także osób znajdujących się побliżej. Aby zredukować liczbę wypadków, niezbędnie jest uwzględnienie ogromnej liczby czynników wpływających na bezpieczeństwo na drogach. Należy wziąć pod uwagę warunki atmosferyczne występujące w danej okolicy, ukształtowanie terenu, rośliność która może niekorzystnie wpływać na widoczność, drzewa znajdujące się w pobliżu tras oraz samo oznakowanie dróg. Ważne są także pojazdy, które biorą udział w ruchu, funkcję jakie spełnia dana droga, ilość pasów ruchu i ich szerokość, liczba zakrętów i promień ich skrętu oraz typ nawierzchni, z której składa się jezdnia. Nie należy lekceważyć także statystyk dotyczących wypadków na danych odcinkach dróg. Na bezpieczeństwo na drogach wpływ mają również producenci pojazdów. Rozwijane przez nich inteligentne czujniki oraz systemy wspomagania jazdy mają kluczowe znaczenie w redukcji ryzyka popełnienia błędu przez człowieka.

W tabeli 1.1. znajduje się zestawienie przedstawiające tolerancje biomechaniczną człowieka dla różnych typów pojazdów.

**Tabela 1.1. Biomechaniczna tolerancja na wypadki**

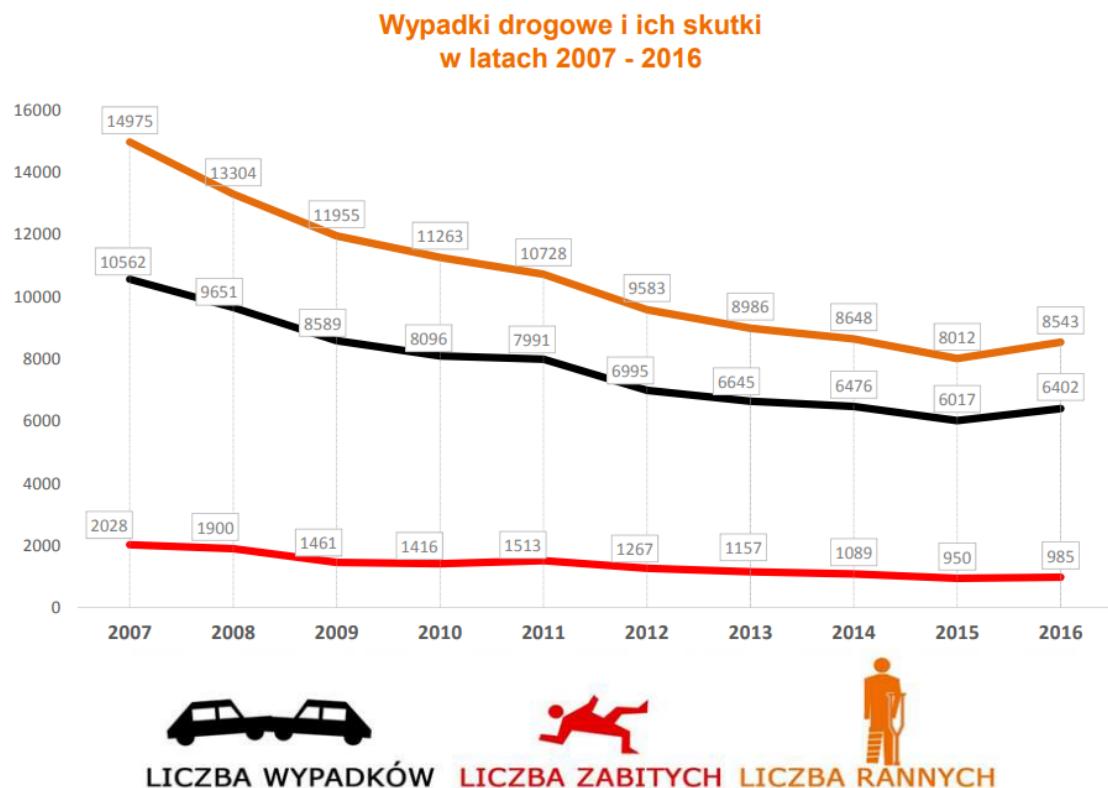
<b>Typ wypadku</b>	<b>Prędkość uderzenia</b>
samochód / pieszy / rowerzysta	20 - 30 km/h
samochód / motocykl	20 - 30 km/h
samochód / drzewo lub słup	30 - 40 km/h
samochód / samochód (zderzenie boczne)	50 km/h
samochód / samochód (zderzenie czołowe)	70 km/h

Source: Na podstawie Austroroads 2005

Z tabeli 1.1. odczytać można, że najbardziej podatni na zagrożenia w ruchu drogowym są piesi, rowerzyści i motocykliści. Oczywiście są to uśrednione dane. Ryzyko poważnych obrażeń, a nawet śmierci, w niektórych przypadkach może wystąpić przy jeszcze mniejszych prędkościach.

W "Raport o stanie bezpieczeństwa ruchu drogowego dla dróg krajowych w zarządzie GDDKiA" opublikowanym na stronie Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad, znajduje się zestawienie liczby wypadków drogowych i ich skutków, w latach 2007 - 2016.

Rys. 1.1. wypadki drogowe i ich skutki



Source: Raport o stanie bezpieczeństwa ruchu drogowego dla dróg krajowych w zarządzie GDDKiA.

Z Rys. 1.1 odczytać można, że liczba wypadków, z jednym wyjątkiem (z roku 2016) nieustannie maleje. W 2007 roku miało miejsce 10562 wypadków, w których liczba zabitych wyniosła 2028 osób, natomiast rannych było 14975. W porównaniu z 2016 zostało odnotowane spadek o ok. 40 %. Niewątpliwie jest to ogromny sukces, jednak liczba ta dalej jest zatrważająco wysoka.

## 1.2. Cele pracy

Główym celem niniejszej pracy dyplomowej było stworzenie intelligentnego systemu, mającego za zadanie predykcję dopuszczalnych prędkości w ruchu drogowym. Ponadto zostały opracowane modele i narzędzia pozwalające na obliczenie prędkości na drogach. Rozwiążanie bazuje na metodach automatycznego wnioskowania, modelach matematycznych i informacjach geoprzestrzennych. Dzięki temu, możliwe było wyznaczenie optymalnego rozwiązania dla złożonego, wielokryterialnego problemu,

w którym kluczowe znaczenie miało bezpieczeństwo uczestników ruchu drogowego, przy zachowaniu maksymalnej przepustowości infrastruktury drogowej.

Algorytm predykcji dopuszczalnych prędkości w ruchu drogowym wykorzystuje następujące informacje

- **pojedyncze poziome zakręty** - zostały podzielone na trzy grupy, według długości promienia skrętu:
  - **mały promień skrętu** - o maksymalnej długości promienia 300m
  - **średni promień skrętu** - o długości promienia powyżej 300m i poniżej 600m
  - **duży promień skrętu** - o długości promienia powyżej 600m
- **pobliże szkół i miejsc zabaw** - w takich przypadkach prędkość musiała zostać dobrana, aby kierowca bez przeszkód mógł zatrzymać się, nie powodując zagrożenia dla zdrowia i życia osób niepełnoletnich. Należy mieć na uwadze fakt, że zachowanie małoletnich osób często jest nieobliczalne. Nigdy nie wiadomo kiedy mogą pojawić się na drodze
- **pobliże sklepów i miejsc kultów religijnych** - dostosowanie prędkości do większego niż zwykle ruchu pieszych jak i pojazdów mechanicznych.
- **pobliże przystanków autobusowych i tramwajowych** - zdarzają się szczególne sytuacje, gdy pasażerowie komunikacji zbiorowej, bez uprzedniego upewnienia się, biegą do już odjeżdżającego autobusu czy tramwaju. W takim przypadku szczególnie ważne jest dostosowanie prędkości, żeby kierowca mógł bez przeszkód, odpowiednio wcześniej, zareagować na taką ewentualność
- **przejścia dla pieszych** - w sytuacjach jak powyżej, z tą różnicą, że zamiast na autobus, przebiegają na "późnym zielonym" lub czasem już czerwonym. Do takich sytuacji najczęściej dochodzi w miastach, gdzie tempo życia jest bardzo duże. Należy pamiętać, że ok. 25% wypadków na przejściach z sygnalizacją spowodowane jest wtargnięciem pieszego na czerwonym świetle
- **ilość pasów ruchu** - prędkość jest większa na kilku pasmowej drodze, w porównaniu z jednopasmową
- **typ nawierzchni** - jest to bardzo ważny czynnik, ponieważ pojazdy mechaniczne, poruszając się z nieodpowiednią prędkością po nieprzystosowanej do tego nawierzchni, np. żwirowej, bardzo szybko ulegają kosztownym uszkodzeniom
- **typ drogi** - w skład których wchodzą autostrady, drogi osiedlowe, ekspresowe, główne itp.
- **zmiana prędkości między poszczególnymi strefami ograniczeń prędkości** - płynna jazda jest znacznie mniej ryzykowna niż nagła zmiana prędkości pojazdu. Dlatego w sytuacjach, gdy na drodze znajduje się np. przejście dla pieszych, należy stopniowo ustawać coraz to niższe wartości znaków sygnalizujących ograniczenie prędkości

- **przejazdy kolejowe** - są zarówno strzeżone jak i niestrzeżone. W obu przypadkach należy zachować szczególną ostrożność, dlatego też prędkość musi być odpowiednio niższa. Trzeba mieć na uwadze, że przez dużą masę pojazdów szynowych, wypadki kolejowe należą do jednych z najbardziej śmiertelnych.

Oprócz danych pobranych z OpenStreetMap, program posiada możliwość manualnego, przez zwykłego użytkownika, definiowania obiektów i przeszkód na drodze. Jest to szczególnie istotne, gdyż nie wszystkie dane umieszczone są w OSM.

Kluczową kwestią działanie algorytmu są również miejsca, w których powinien umieszczać znaki ograniczenia prędkości. Kierowca odpowiednio wcześniej musi zostać poinformowany o przeszkodzie na drodze, żeby mieć wystarczającą ilość czasu na reakcję. Dla przykładu, niedopuszczalna jest sytuacja, podczas której kierowca podróżując z szybkością 90 km/h, natrafi na znak informujący o znajdujący się za nim przejściu dla pieszych. Prawidłowo działający algorytm, powinien informować o potrzebie stopniowej redukcji prędkości, poprzez umieszczanie znaków ograniczeń prędkości o coraz to mniejszych wartościach. Dzięki temu możliwe jest zapewnienie płynność jazdy, przy zachowaniu odpowiedniego bezpieczeństwa.

### 1.3. Wykorzystane technologie

Cała aplikacja bazuje na dynamicznej stronie internetowej. W tym celu został wykorzystany stos technologiczny, bazujący na javascriptie, jakim jest MEAN stack. Miałem kilka powodów, dla których wybrałem te konkretne technologie. Pierwszym jest rosnąca popularność tego stosu. Coraz więcej firm przekonuje się do tej technologii, więc popyt na programistów z tego zakresu rośnie z roku na rok. Drugim powodem jest fakt, że można go uruchomić na prawie każdym urządzeniu czy platformie, dzięki czemu jest zapewniona duża przenośność kodu. Dodatkowo MEAN stack idealnie nadaje się do prostych, skalowalnych aplikacji webowych, w których nacisk kładziony jest na wymianę danych w czasie rzeczywistym na wielu urządzeniach.

Back-end aplikacji został napisany w Node.js. Jego głównym zadaniem jest połączenie się z mLabem w celu pobrania, zapisu, edycji i usuwania danych. Ponadto komunikuje się również z frontendem, po to, aby przekazywać pobrane dane. Dodatkowo, w celu zmniejszenia objętości kodu i tym samym zwiększenia jego czytelności, został użyty framework Express.js.

Za zarządzanie front-endem odpowiedzialny jest angular w wersji 5. Na nim została uruchomiona biblioteka Leaflet. Umożliwia ona wyświetlanie interaktywnej mapy, którą zasilić można różnymi typami danych, np. w formacie GeoJson. Dzięki niej, użytkownik zyskał możliwość wprowadzania swoich danych, przeglądania już istniejących czy zasięgnięcia informacji o dozwolonych prędkościach na danych odcinkach dróg. Kolejną, istotną funkcjonalnością biblioteki Leaflet jest możliwość zarządzania wyświetlonymi obiektami. W prosty sposób można ukryć wszystkie dane, wyświetlać tylko drogi, tylko ograniczenia prędkości lub różne kombinacje danych, które nas interesują.

## 1.4. Przegląd literatury

Han(2009) podaje przykład, jak zmiana prędkości wpływa na bezpieczeństwo i płynność jazdy. Jeśli kierowca napotka zbyt wiele stref prędkości z obrębie krótkiego odcinka drogi lub zbyt wiele zmian ograniczeń prędkości w sąsiedztwie danej strefy, to wtedy może poczuć dezorientację. Zwraca uwagę, jak ważne jest rozmieszczenie odpowiednich znaków, dla zredukowania poziomu stresu kierowcy.

Nama(2016) przedstawia jak kierowcy dostosowują prędkość w sytuacji gdy znajdują się na górzystej, nieregularnej drodze. Średnia wariancja prędkości w takim terenie wynosi ok. 55%. Spowodowane jest to połączeniem cech geometrycznych zarówno poziomych jak i pionowych. Kierowcy na potrzeby bezpieczeństwa, w przypadku poziomych zakrętów, zmniejszają prędkość. Dodatkowym czynnikiem jest także ciągłe, zmieniające się nachylenie terenu. Uwzględnić należy również fakt, że zakręty znajdujące się na szczycie, wyglądają na znacznie bardziej niebezpieczne niż są w rzeczywistości. Wszystkie te czynniki w niekorzystny sposób wpływają na utrzymywanie stałej prędkości. Tabela 1.2. przedstawia średnią prędkość pojazdów w zależności od promienia krzywizny zakrętu, jego długości oraz nachylenia.

**Tabela 1.2.** Średnie prędkości pojazdów w zależności od promienia krzywizny, długości oraz nachylenia

<b>promień krzywizny (m)</b>	<b>nachylenie (%)</b>	<b>długość zakrętu (%)</b>	<b>średnia prędkość (km/h)</b>
50	4	74	48.9
100	2	139	47.8
100	-6	33	56.2
100	6	33	49.9
150	-6	31	49.8
150	-4	64	54.3
150	2	32	54.7
150	4	43	52.1
200	-4	56	54.2
200	-2	27	59.6
200	2	205	45.8
200	4	10	60.9
200	6	102	50.1
300	-6	73	58.2
300	2	74	52.6

Source: Na podstawie Expanded Operating Speed Model

W tabeli 1.2 znalazły się dane z obserwacji na drodze, na której ograniczenie prędkości wynosiło 50 km/h. Zauważać można, że w 45% prędkość była wyższa niż dopuszczalna.

Forbes(2012) wspomina o relacji pomiędzy prędkością, a ryzykiem wypadku dla prędkości pomiędzy 25 km/h a 120 km/h. Gdy średnia prędkość ruchu jest zmniejszona, liczba wypadków i poziom niebezpieczeństwa spowodowania urazów prawie zawsze maleje. Gdy średnia prędkość ruchu wzrasta, liczba wypadków i poziom niebezpieczeństw spowodowania urazów przeważnie rośnie. Relacja między średnią prędkością a ryzykiem wypadków może być adekwatnie opisana według poniższego modelu:

$$CMF = (V_a/V_b)^X \quad (1.1)$$

gdzie

$CMF$  – Współczynnik modyfikacji wypadku

$V_a$  – średnia prędkość przed warunkiem

$V_b$  – średnia prędkość po warunkiem

$X$  – 3.6 dla częstotliwości wypadków, w których pojawiły się ofiary śmiertelne

2.0 dla częstotliwości wypadków, w których nie było ofiar śmiertelnych

1.0 dla częstotliwości gdzie uszkodzeniu uległy tylko pojazdy

4.5 dla ofiar śmiertelnych

2.7 dla których poszkodowani ponieśli tylko obrażenia ciała

Porównuje także ograniczenia prędkości dla poszczególnych obszarów znajdujących się w USA. Ich wynik znajduje się w tabeli 1.3.

Han(2009) zwraca uwagę, jak pora dnia wpływa na ruch na drodze. W godzinach porannych, gdy osoby pracujące jadą do pracy, osoby nieletnie do szkół oraz w godzinach popołudniowych, gdy wracają do domów. Obserwowany jest wzmożony ruch na drogach. Więcej pojazdów na drodze, oznacza większe korki, a co za tym idzie, zmniejszenie rzeczywistej prędkości. Natomiast w pozostałych porach dnia, gdy ruch jest mniejszy, możliwe jest szybsze poruszanie się po drodze. C. Han opisuje także jak prawidłowo ustawać znaki drogowe. Oznakowanie powinno być umieszczone w każdym odpowiednim punkcie wzdłuż drogi, np. wokół potencjalnych punktów konfliktowych, zwężeniach i rozwidleniach dróg, zmianie ich nawierzchni itp. Powtórzenia znaków, najlepiej żeby były w odległości 1000m na autostradach. W obszarach miejskich, rekomendowana odległość to 400-500 m.

Jurewicz(2014) wskazuje bezpośrednią relację pomiędzy prędkością a ryzykiem wypadku. W sytuacji gdy prędkość jest zmniejszana, liczba wypadków i rannych spada w 85 procentach przypadków. Gdy prędkość jest zwiększana, liczba wypadków i rannych wzrasta w 71 procentach przypadków. Największym dowodem na to są tak zwane badania 'przed i po'. W latach 1980 ograniczenie prędkości dla wiejskich i zewnętrznych autostrad w metropolii zostało zwiększone ze 100 km/h do 110 km/h, ale zostało z powrotem zredukowane do 100 km/h z powodu obaw o bezpieczeństwo. Badanie 'przed, w trakcie i po' zostało prowadzone na przestrzeni 2,5 roku. W sytuacji, gdy ograniczenie prędkości zostało zwiększone do 110 km/h, wskaźnik ofiar wypadków wzrósł o prawie 25%. Gdy prędkość ponownie została zmniejszona do 100 km/h wskaźnik zmalał o prawie 20%.

**Tabela 1.3.** Ograniczenia prędkości w różnych stanach

<b>Stan</b>	<b>Prędkość</b>	<b>Obszar</b>
Delaware	40 km/h	dowolna dzielnica biznesowa
	40 km/h	dowolna dzielnica mieszkalna
	30 km/h	wszystkie strefach szkolnych
	80 km/h	dwupasmowa jezdnia
	90 km/h	czteropasmowa jezdnia
Minneasota	15 km/h	alejki
	50 km/h	ulice dzielnic miejskich
	110 km/h	wiejskie autostrady międzystanowe
	105 km/h	miejskie autostrady międzystanowe
	105 km/h	drogi ekspresowe
	90 km/h	pozostałe drogi
Oregon	25 km/h	alejki, wąskie uliczki mieszkalne
	30 km/h	dzielnice biznesowe, strefy szkolne
	40 km/h	dzielnice mieszkalne, parki publiczne, brzegi oceanu
	90 km/h	wiejskie autostrady, ciężarówki na międzystanowych autostradach
	105 km/h	pojazdy pasażerskie, lekkie ciężarówki na międzystanowych autostradach

Source: Na podstawie Methods and Practices for Setting Speed Limits: An Informational Report

Vadeby i Frosman (2018) przeprowadzili badania na temat, jak nowe ograniczenia prędkości wpływały na bezpieczeństwo. Dla przykładu, gdy na wiejskich drogach została zmniejszona wartość dozwolonej prędkości z 90 km/h do 80 km/h, zauważono spadek liczby wypadków śmiertelnych o 14 w skali roku. Nie zauważono natomiast żadnych znaczących zmian dla liczby poważnych obrażeń ciała. Na autostradzie, po zwiększeniu dozwolonej prędkości do 120 km/h, zanotowano wzrost wypadków, w których doszło do poważnych obrażeń. Nie odnotowano natomiast znaczącej zmiany względem ofiar śmiertelnych. Wzrost liczby poważnych obrażeń ciała wystąpił na wszystkich rodzajach autostrad, jednak największy wzrost został zauważony na wąskich autostradach o szerokości 21.5 m. Dla dwupasmowych jezdni, po zmniejszeniu prędkości ze 110 do 100 km/h, doszło do zmniejszenia liczby wypadków z poważnymi obrażeniami ciała o 16 w skali roku. Vadeby i Frosman (2018) wskazują także na fakt, iż wzrost dozwolonej prędkości o 10 km/h spowodował średni wzrost prędkości pojazdów mechanicznych o ok. 2-3 km/h, a zmniejszenie dozwolonej prędkości o 10 km/h, spowodowało zmniejszenie średniej prędkości pojazdów o 3 km/h.

Soriguera i inni (2017) przeprowadzili badanie, które wykazało, jak mała wartość ograniczenia prędkości wpływa na ruch uliczny. Jako rezultat, uzyskali następujące wyniki.

- Dla ograniczenia prędkości do 80 km/h, maksymalna przepustowość może wynieść 1972 samochodów na godzinę na jednym pasie ruchu, dla szerokiego zakresu zajętości jezdni (17.6 - 25.8%) i średniej prędkości wahającej się między 51 a 73 km/h
- Dla ograniczenia prędkości do 60 km/h, maksymalna przepustowość nie uległa dużej zmianie, wyniosła 1956 pojazdów na godzinę na jednym pasie ruchu. Zajętość jezdni utrzymywała się na wysokim poziomie 24.4 - 25.8%.
- Dla ograniczenia prędkości do 40 km/h, maksymalna przepustowość nieznacznie zmalała, do poziomu 1942 samochodów na godzinę na jednym pasie ruchu. Natomiast znacznie wzrosła zajętość jedni, wynosiła 32.0 - 34.7%.

Z powyższych wyników, można dojść do dwóch wniosków. Pierwszy jest taki, że zmniejszenie prędkości skutkuje znacznym zwiększeniem poziomu zajętości jezdni w warunkach swobodnego przepływu. W skrócie, zmniejszenie prędkości pozwala osiągnąć stabilny, wysoki poziom zajętości jezdni, zapobiegając tym samym różnym wypadkom i utrzymywaniem dużej akumulacji pojazdów na drodze. Drugi wniosek jest taki, że dla małej prędkości, jaką jest 40 km/h, średnia prędkość przepływu pojazdów, wynosząca 1942 pojazdów/h/pas, może zostać podtrzymana przez dłuższy okres. W praktyce oznacza to znaczne zmniejszenie prawdopodobieństwa wystąpienia korków na drodze.

## 1.5. Układ pracy

Praca składa się z 5 rozdziałów.

- Pierwszy z nich zawiera wstęp, cele pracy, wykorzystane technologie oraz przegląd literatury.
- W drugim rozdziale zawarto opracowanie teoretyczne poszczególnych części algorytmu. Przedstawiono również ogólny schemat, sposób w jaki algorytm pobiera dane, skąd je bierze i jak je parsuje, przetwarza i wyświetla na stronie.
- Trzeci rozdział opisuje poszczególne obiekty, wykorzystywane przez algorytm wraz z ich wizualizacją.
- W czwartym rozdziale został przedstawiony interfejs użytkownika
- Piąty zawiera wnioski z celów postawionych w niniejszej pracy.

## **2. Koncepcja i projekt systemu**

W niniejszy rozdział skupia się na przygotowaniu systemu do jego implementacji. Przedstawione zostały: w pierwszej sekcji ogólny opis systemu, następnie specyfikacja wymagań, w dalszej części architektura systemu, a na końcu projekt bazy danych.

### **2.1. Ogólny opis systemu**

#### **2.1.1. Cele**

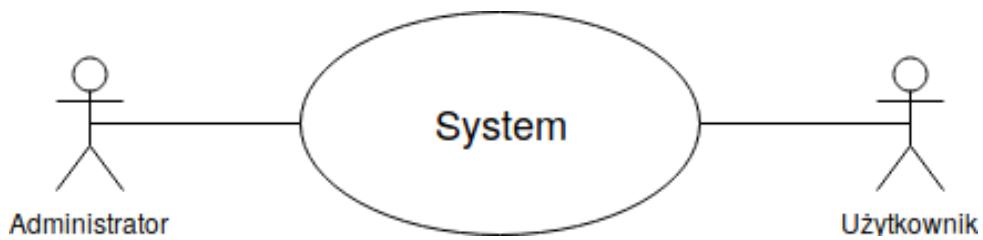
Główym celem postawionym przed aplikacją internetową jest zapewnienie bezpieczeństwa na drodze, przy równoczesnym zachowaniu optymalnej przepustowości. Dlatego jej kluczowym elementem jest duża, czytelna mapa, na której umieszczone zostały dopuszczalne prędkości w zależności od różnych czynników drogowych, od typu nawierzchni, rodzaju drogi, ilości pasów ruchu, aż po pobliże budynków, przejść dla pieszych, sygnalizacji świetlnej czy przejazdów kolejowych.

#### **2.1.2. Udziałowcy i użytkownicy**

- Użytkownicy aplikacji
- Administratorzy

#### **2.1.3. Granice systemu (wejścia, wyjścia)**

**Rys. 2.1. Granice systemu**



#### 2.1.4. Podstawowe cele udziałowców i użytkowników

**Tabela 2.1.** Podstawowe cele udziałowców i użytkowników

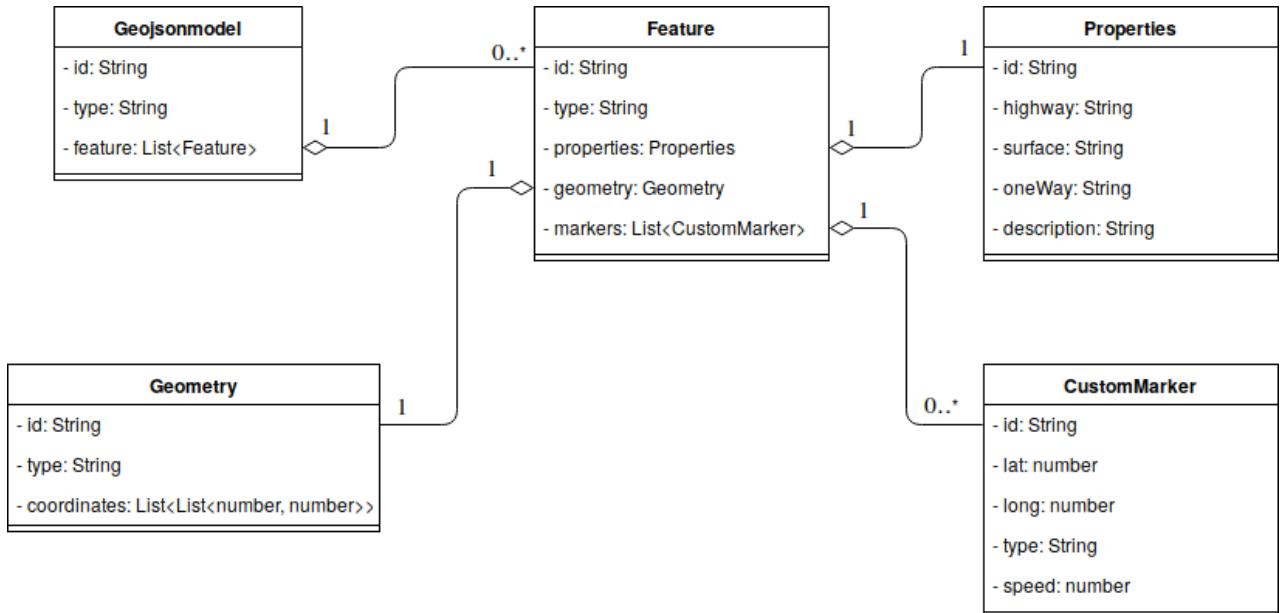
Udziałowiec	Cel	Priorytet
Administrator	Dodawanie domyślnych obiektów drogowych możliwych do wybrania	Wysoki
Administrator	Usuwanie domyślnych obiektów drogowych	Wysoki
Użytkownik	Wybieranie obiektów reprezentowanych przez punkt do mapy	Wysoki
Użytkownik	Wybieranie obiektów reprezentowanych przez dwuwymiarowe figury geometryczne	Wysoki
Użytkownik	Usuwanie obiektów reprezentowanych przez punkt do mapy	Wysoki
Użytkownik	Usuwanie obiektów reprezentowanych przez dwuwymiarowe figury geometryczne	Wysoki
Użytkownik	Wybieranie warstw mapy	Średni
Użytkownik	Wyświetlanie współrzędnych punktu	Niski

#### 2.1.5. Lista możliwości

- Wyświetlanie mapy
- Wyświetlanie warstw mapy w zależności od danego czynnika
- Wyświetlanie współrzędnych obiektu
- Dodawanie obiektów reprezentowanych przez punkt
- Dodawanie obiektów reprezentowanych przez dwuwymiarowe figury geometryczne
- Usuwanie obiektów reprezentowanych przez punkt
- Usuwanie obiektów reprezentowanych przez dwuwymiarowe figury geometryczne

### 2.1.6. Diagram klas

Rys. 2.2. Diagram klas



## 2.2. Opis klas aplikacji

Klasy aplikacji zostały podzielone na sześć grup:

- calcucationOperations
- components
- layerManagers
- mapObjects
- models
- services

W niniejszej sekcji każde nich zostały dokładnie omówione

### 2.2.1. CalculationOperations

W pakiecie calcutaionOperations znajdują się klasy odpowiedzialne za wykonywanie obliczanie dla poszczególnych części algorytmu. Składa się z:

- BoundingBox - klasa zajmująca się obliczeniami związanymi z minimalnym obszarem pokrywającym, dokładniej opisanym w rozdziale 3.4, 3.5 oraz 3.6
- Curves - klasa zajmująca się obliczeniami związanymi z zakrętami. Opis znajduje się w rozdziale: 3.11

### 2.2.2. components

W tym pakiecie znajdują się elementy odpowiedzialne za wyświetlanie danych oraz za sam wygląd strony. W skład nich wchodzą:

- app.component.ts - zajmuje się dostarczeniem danych do wyświetlenia
- app.component.html - wyświetla dane na stronie
- app.component.css - modyfikuje wygląd strony

### 2.2.3. layerManagers

Pakiet, w którym znajdują się klasy odpowiedzialne za przygotowanie warst mapy. Zostały w nim umieszczone:

1. BaseLayerManager - menadżer warstwy podstawowej
2. DbLayerManager - menadżer warstw wyświetlających przetworzone dane z bazy

### 2.2.4. mapObjects

W tym pakiecie zostały umieszczone klasy odpowiedzialne za przetwarzanie obiektów. Należą do nich

- OneDimensions - klasa odpowiedzialna za przetwarzanie obiektów jednowymiarowych takich jak przejścia dla pieszych, przejazdy kolejowe oraz sygnalizacje świetlną
- TwoDimension - klasa odpowiedzialna za przetwarzanie obiektów dwuwymiarowych takich jak szkoły, place zabaw, kościoły, sklepy, przystanki autobusowe i tramwajowe
- OtherObjects - klasa odpowiedzialna za uzględnianie innych czynników znajdujących się na drodze, takich jak liczba pasów ruchu czy typ drogi.

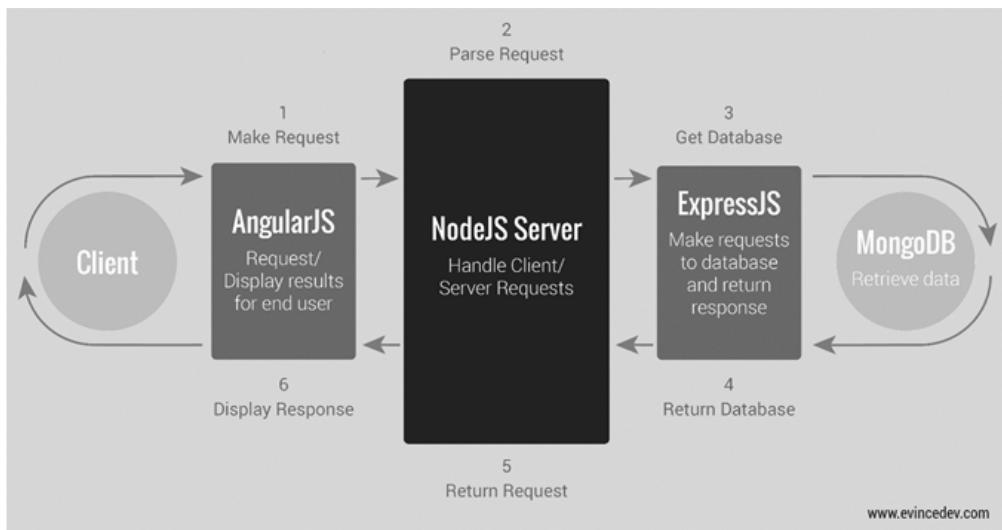
### 2.2.5. models

### 2.2.6. services

## 2.3. Architektura systemu

System powstał na bazie stosu technologicznego MEAN Stack. Poniżej, na rys. 2.3 została przedstawiona architektura tego stosu.

Rys. 2.3. Architektura stosu MEAN



Source: Na podstawie evincedev.com

Na rys. 2.3 został przedstawiony przebieg od wysłanego zapytania przez klienta do wyświetlonej odpowiedzi:

1. Gdy klient wysyła zapytanie, najpierw jest ono przetwarzane przez Angulara po stronie klienta
2. W dalszej kolejności zapytanie zostaje przekazany do NodeJS po stronie serwera
3. Następnie zapytanie wędruje do ExpressJS, który pobiera dane z MongoDB.
4. Pobrane dane zostają z MongoDB zostają przekazane do ExpressJS
5. ExpressJS przesyła odpowiedź do Angulara
6. Angular wyświetla odpowiedź.

### **3. Algorytm - opracowanie teoretyczne**

Niniejszy rozdział skupia się na opracowaniu teoretycznym algorytmu służącego do rozwiązania problemu, jakim jest wyznaczenie optymalnej prędkości na drodze. Został w nim przedstawiony ogólny zarys działania algorytmu, oraz opisane poszczególne składowe takie jak:

- przyporządkowanie obiektów reprezentowanych przez punkty, do poszczególnych dróg
- przyporządkowanie obiektów reprezentowanych przez dwuwymiarowe figury geometryczne, do poszczególnych dróg
- wyznaczanie dopuszczalnej prędkości
- odpowiednie umiejscowienie znaków
- wyznaczanie minimalnych obszarów pokrywających obiekty dwuwymiarowe

Dodatkowo, w celu lepszej wizualizacji problemu, zostały umieszczone zdjęcia przedstawiające działanie poszczególnych części algorytmu.

#### **3.1. Ogólny zarys algorytmu**

W pierwszej kolejności, na potrzeby działania algorytmu, należy dostarczyć plik z danymi geograficznymi interesującego nas obszaru. Można go pobrać ze strony: [www.openstreetmap.org](http://www.openstreetmap.org).

Po wczytaniu pliku przez program, następuje jego parsowanie. Odbywa się to poprzez rzutowanie na wcześniej przygotowaną klasę o takiej samej strukturze jak poszczególne obiekty z pliku. Gdy dane zostały już sparsowane i wczytanie do pamięci komputera, następuje odfiltrowanie potrzebnych obiektów na dwie kategorie:

- ulice, przedstawiane jako zbiór odcinków
- obiekty, które mogą być punktami lub obiektami geometrycznymi dwuwymiarowymi.

Po tej operacji następuje ich zapis do serwisu hostującego: [www.mlab.com](http://www.mlab.com)

Następną czynnością jest pobranie wcześniej przygotowanych danych z bazy i zapis ich do dwóch kolekcji: ulic i obiektów. W dalszej kolejności algorytm iteruje po tych kolekcjach i przypisuje obiekty do poszczególnych dróg. Gdy wszystkie obiekty zostały przypisane do ulic, następuje wyznaczanie prędkości w postaci markerów na wcześniej przygotowaną mapę.

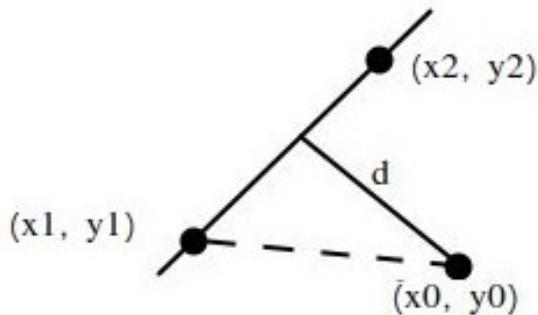
### 3.2. Przyporządkowanie obiektów reprezentowanych przez punkty, do poszczególnych dróg

Jednym z kluczowych elementów działania algorytmu jest odpowiednie przyporządkowanie obiektów drogowych do poszczególnych dróg. W OpenStreetMap reprezentowane są zarówno przez punkty, jak również przez dwuwymiarowe obiekty geometryczne.

Obiekty z OpenStreetMap reprezentowane przez punkty:

- przejścia dla pieszych
- przejazdy kolejowe
- sygnalizacja świetlna

W niniejszej sekcji skupię się na rozwiązaniu problemu jakim jest przyporządkowanie obiektów przedstawianych jako punkty, do poszczególnych dróg. Do tego celu wykorzystam wzór 3.1, wyznaczający odległość punktu od prostej.



Source: Na podstawie mathworld.wolfram.com

Wzór wyznaczający odległość punktu od prostej:

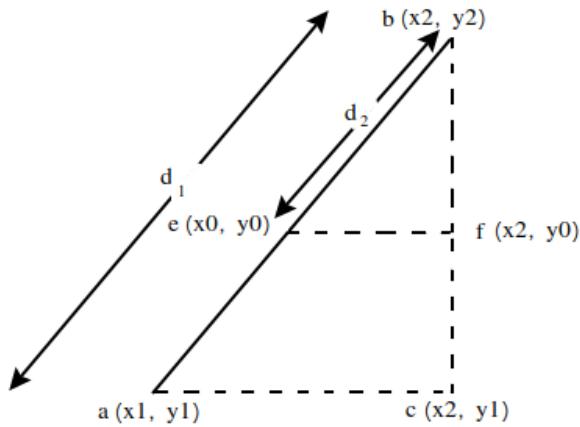
$$d = \frac{|(x_2 - x_1)(y_1 - y_0) - (x_1 - x_0)(y_2 - y_1)|}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}} \quad (3.1)$$

- Zmienne:  $x_1, y_1, x_2, y_2$  oznaczają współrzędne geograficzne odpowiednio początku i końca drogi.
- Zmienne  $x_0, y_0$  oznaczają współrzędne punktu reprezentującego obiekt drogowy.
- Zmienna  $d$  oznacza najkrótszą odległość punktu od drogi.

### 3.3. Wyznaczanie współrzędnych punktu znajdującego się na drodze, odległego o n metrów od innego punktu

Istotnym aspektem działania algorytmu jest rozwiązywanie problemu wyznaczenie współrzędnych punktu, znajdującego się na drodze, odległego o n metrów od innego punktu. Jest to niezbędne w sytuacji, gdy np. program musi ustawić na drodze znak ograniczenia prędkości w odległości n metrów od obiektu.

Do rozwiązania tego zadania, posłużyłem się własnościami trygonometrycznymi.



Odległość między dwoma punktami a i b wynosi:

$$d_1 = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (3.2)$$

oraz sinus kąta abc:

$$\sin_{abc} = \frac{x_2 - x_1}{d_1} \quad (3.3)$$

jak również sinus kąta ebf:

$$\sin_{ebf} = \frac{x_2 - x_0}{d_2} \quad (3.4)$$

oraz to, że sinusy tego samego kąta są równe:

$$\sin_{abc} = \sin_{ebf} \Rightarrow \frac{x_2 - x_1}{d_1} = \frac{x_2 - x_0}{d_2} \quad (3.5)$$

**26** 3.3. Wyznaczanie współrzędnych punktu znajdującego się na drodze, odlegiego o  $n$  metrów od innego punktu

przez proste przekształcenie, został wyliczony wzór na współrzędną  $x_0$

$$x_0 = x_2 - \frac{d_2 * (x_2 - x_1)}{d_1} \quad (3.6)$$

Wyznaczenie wzoru na współrzędną  $y_0$  jest podobne do wyznaczania współrzędnej  $x_0$ , z tą różnicą, że zamiast sinusa, należy policzyć cosinusa kąta  $abc$ :

$$\cos_{abc} = \frac{y_2 - y_1}{d_1} \quad (3.7)$$

oraz cosinusa kąta  $ebf$ :

$$\cos_{ebf} = \frac{y_2 - y_0}{d_2} \quad (3.8)$$

a skoro cosinus tego samego kąta są równe:

$$\cos_{abc} = \cos_{ebf} \Rightarrow \frac{y_2 - y_1}{d_1} = \frac{y_2 - y_0}{d_2} \quad (3.9)$$

to równanie współrzędnej  $y_0$  wynosi:

$$y_0 = y_2 - \frac{d_2 * (y_2 - y_1)}{d_1} \quad (3.10)$$

Przez powyższe obliczenia, wyznaczone zostały współrzędne poszukiwanego punktu:

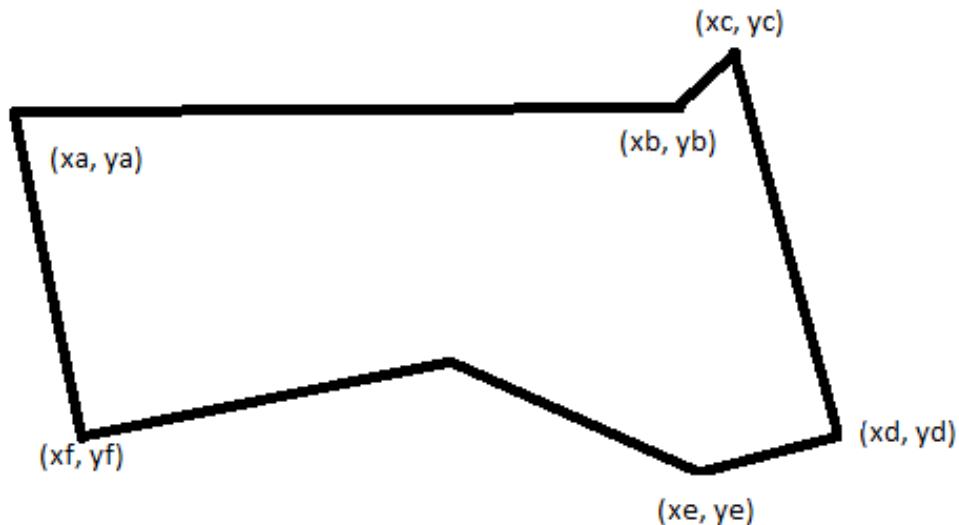
$$(x_2 - \frac{d_2 * (x_2 - x_1)}{d_1}, y_2 - \frac{d_2 * (y_2 - y_1)}{d_1}) \quad (3.11)$$

### 3.4. Wyznaczanie minimalnego obszaru pokrywającego

W niniejszej sekcji skupię się na sposobie w jaki algorytm wyznacza minimalny obszar pokrywający (eng. minimum bounding box). Będzie on wykorzystany w późniejszych obliczeniach, mających na celu przypisanie poszczególnych dróg do danych obszarów, na których obowiązuje ograniczenie prędkości.

Rys. 3.1 przedstawia przykładowy wielokąt reprezentujący interesujący nas obiekt pobrany z OpenStreetMap.

Rys. 3.1. Przykładowy wielokąt reprezentujący obiekt na mapie



W celu znalezienia minimalnego obszaru pokrywający niezbędne jest wyznaczenie czterech współrzędnych  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), (x_4, y_4)$  reprezentujących cztery wierzchołki prostokąta.

W celu wyznaczenia wierzchołka północno-zachodniego, należy obliczyć minimalną wartość współrzędnej x oraz maksymalną wartość współrzędnej y.

$$\begin{aligned} x_1 &= \min(x_a, x_b, x_c, x_d, x_e, x_f, x_g) \\ y_1 &= \min(y_a, y_b, y_c, y_d, y_e, y_f, y_g) \end{aligned} \tag{3.12}$$

Żeby wyznaczyć wierzchołek północno-wschodni, należy obliczyć maksymalną wartość współrzędnej x i y.

$$\begin{aligned} x_2 &= \max(x_a, x_b, x_c, x_d, x_e, x_f, x_g) \\ y_2 &= \max(y_a, y_b, y_c, y_d, y_e, y_f, y_g) \end{aligned} \tag{3.13}$$

Wierzchołek południowo-wschodni obliczany jest jako maksymalna wartość współrzędnej x oraz minimalna wartość współrzędnej y.

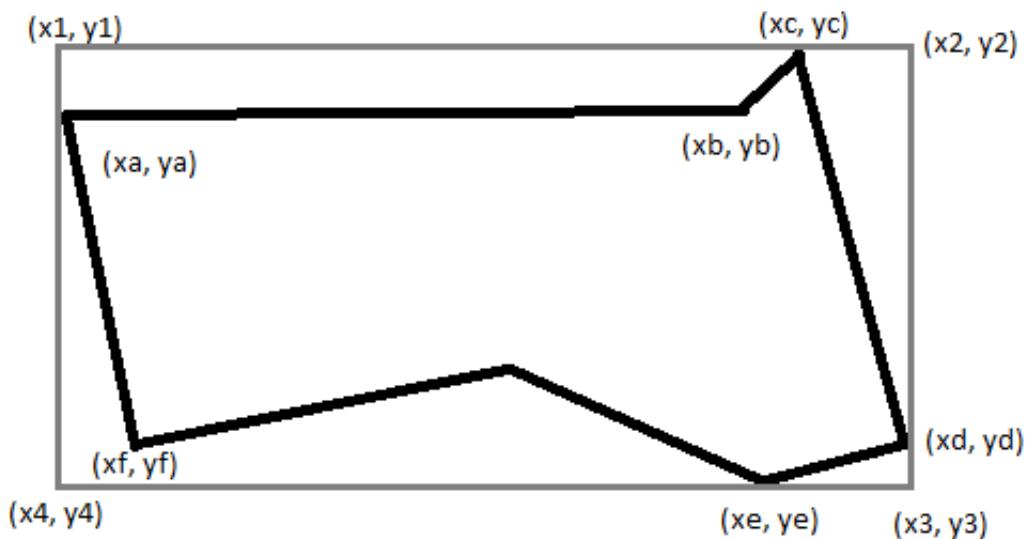
$$\begin{aligned}x3 &= \max(x_a, x_b, x_c, x_d, x_e, x_f, x_g) \\y3 &= \min(y_a, y_b, y_c, y_d, y_e, y_f, y_g)\end{aligned}\quad (3.14)$$

Aby wyznaczyć południowo-zachodni wierzchołek, należy obliczyć minimalną wartość współrzędnej x i y.

$$\begin{aligned}x4 &= \min(x_a, x_b, x_c, x_d, x_e, x_f, x_g) \\y4 &= \min(y_a, y_b, y_c, y_d, y_e, y_f, y_g)\end{aligned}\quad (3.15)$$

Po wyznaczeniu powyższych współrzędnych minimalny obszar pokrywający wygląda tak, jak na rysunku 3.2

Rys. 3.2. Minimalny obszar pokrywający dany obiekt



### 3.5. Powiększanie wyznaczonego obszaru pokrywającego

Kolejnym krokiem niezbędnym do przyporządkowania dwuwymiarowych obiektów do poszczególnych dróg jest powiększenie wyznaczonego obszaru pokrywającego. W tym celu dla każdego wierzchołka algorytm korzysta z poniższych wzorów.

$$\begin{aligned}x1' &= x1 - n \\y1' &= y1 + n\end{aligned}\tag{3.16}$$

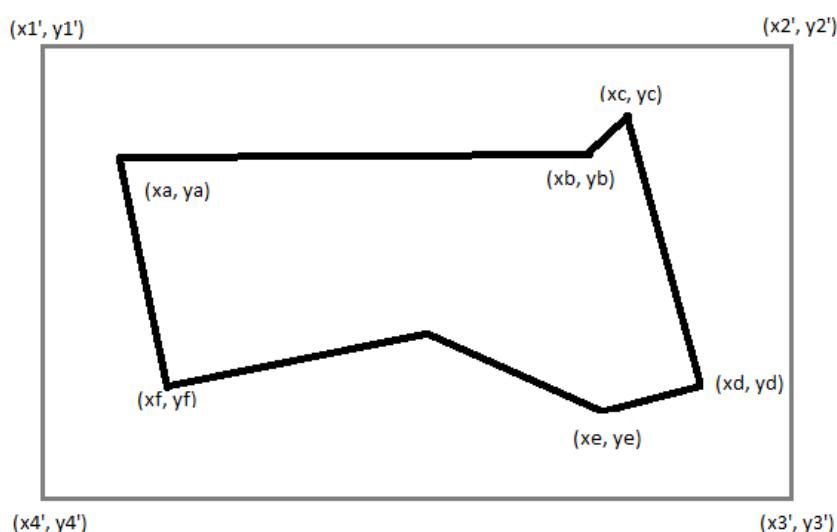
$$\begin{aligned}x2' &= x2 + n \\y2' &= y2 + n\end{aligned}\tag{3.17}$$

$$\begin{aligned}x3' &= x3 + n \\y3' &= y3 - n\end{aligned}\tag{3.18}$$

$$\begin{aligned}x4' &= x4 - n \\y4' &= y4 - n\end{aligned}\tag{3.19}$$

Rys. 3.3 przedstawia minimalny obszar pokrywający powiększony o  $n$  metrów względem pierwotnego. Oczywiście obszar można dowolnie powiększać, w zależności od obiektu, który się w nim znajduje. Tak więc dla placów zabaw czy przedszkoli będzie znacznie większy, w porównaniu do np. przystanków autobusowych.

**Rys. 3.3.** Minimalny obszar pokrywający dany obiekt powiększony o  $n$  metrów



### 3.6. Łączenie powiększonych obszarów pokrywających

W celu przyspieszenia części algorytmu odpowiedzialnego za przypisywanie danego odcinka drogi do obszaru w którym obowiązuje ograniczenie prędkości, niezbędne jest połączenie nachodzących na siebie obszarów oraz wyznaczenie jego konturu. Można rozróżnić kilka przypadków:

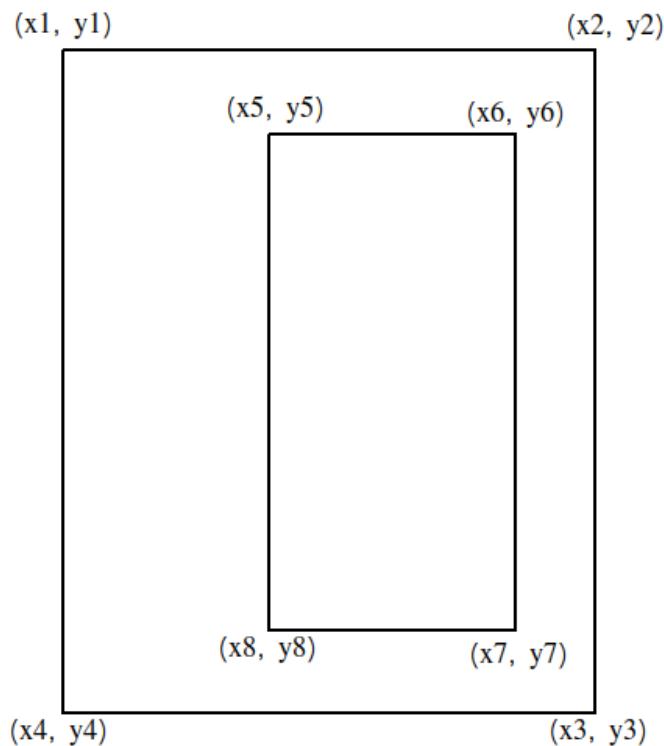
- gdy jeden obszar całkowicie znajduje się wewnątrz drugiego
- gdy dwa rogi obszaru mającego kształt prostokąta znajdują się wewnątrz innego obszaru
- gdy tylko jeden róg obszaru mającego kształt prostokątu znajduje się wewnątrz innego obszaru

W niniejszych podrozdziale skupię na dokładnej metodzie wyznaczania konturu dla każdego z powyższych przypadków.

#### 3.6.1. Łączenie powiększonych obszarów pokrywających w przypadku gdy jeden obszar w całości znajduje się w drugim

Do sytuacji w której dany obszar pokrywający w całości znajduje się wewnątrz innego obszaru dochodzi gdy np. wokół przedszkola znajduje się plac zabaw. W takiej sytuacji można pominąć wewnętrzny obszar. Na rys 3.4 został przedstawiony taki przypadek.

Rys. 3.4. Obszar pokrywający wewnątrz innego obszaru

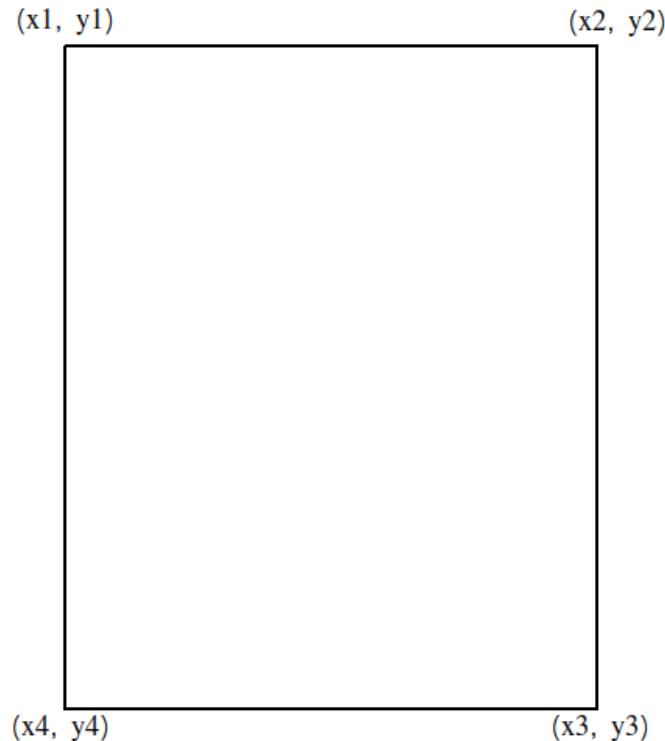


W pierwszym kroku należy znaleźć takie obszary. W tym celu algorytm iteruje po wszystkich obszarach i sprawdza, czy współrzędne spełniają wszystkie niżej przedstawione warunki.

$$\begin{aligned}x4 &\leq x5 \leq x2 \\x4 &\leq x7 \leq x2 \\y4 &\leq y5 \leq y2 \\y4 &\leq x7 \leq y2\end{aligned}\tag{3.20}$$

W następnym kroku algorytm usuwa tak znaleziony obszar. W wyniku czego na mapie pozostaje tylko obszar przedstawiony na rys.3.5

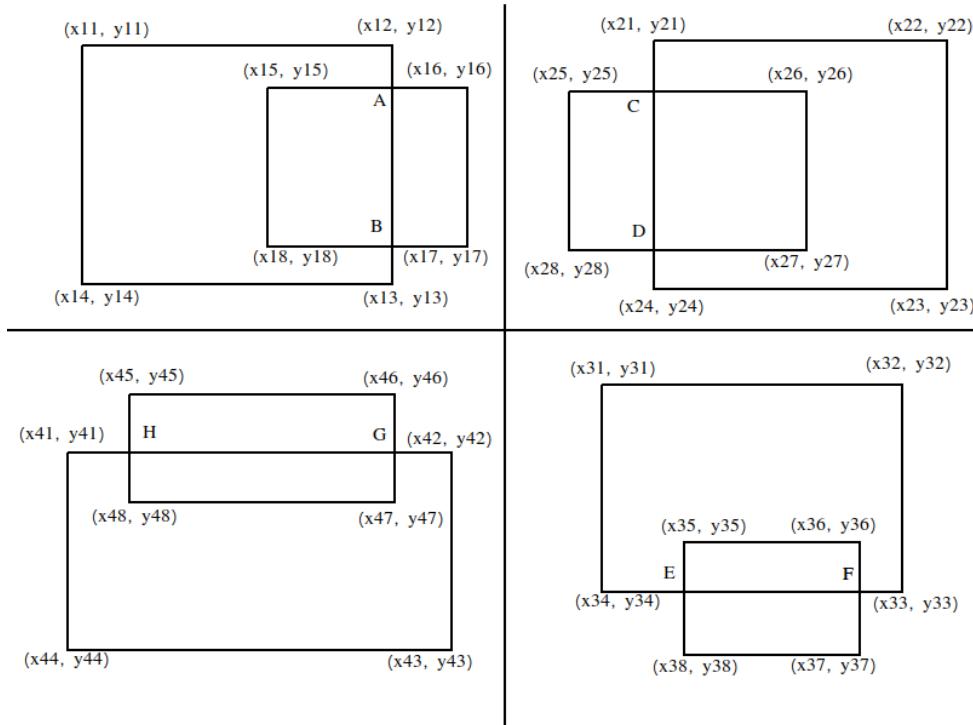
Rys. 3.5. Wynik usunięcia obszaru pokrywającego wewnętrz innego obszaru



### 3.6.2. Łączenie powiększonych obszarów pokrywających w przypadku gdy jeden obszar nachodzi w całości tylko jednym bokiem

W przypadku gdy jeden obszar pokrywający w całości nachodzi tylko jednym bokiem, algorytm rozróżnia cztery możliwe sytuacje. Wszystkie one zostały przedstawione na rysunku 3.6.

**Rys. 3.6.** Wszystkie możliwe sytuacje w których jeden obszar nachodzi na drugi tylko jednym bokiem



W pierwszym kroku należy znaleźć takie obszary. W tym celu algorytm iteruje po wszystkich obszarach i sprawdza, czy współrzędne spełniają wszystkie niżej przedstawione warunki.

Dla pierwszej ósmiarki z rys. 3.6

$$\begin{aligned}
 &x_{11} \leq x_{15} \leq x_{13} \\
 &y_{13} \leq y_{15} \leq y_{11} \\
 &y_{13} \leq y_{18} \leq y_{11} \\
 &x_{13} < x_{16}
 \end{aligned} \tag{3.21}$$

Dla drugiej ósmiarki z rys. 3.6

$$\begin{aligned}
 &x_{24} \leq x_{26} \leq x_{22} \\
 &y_{23} \leq y_{26} \leq y_{21} \\
 &y_{23} \leq y_{27} \leq y_{21} \\
 &x_{25} < x_{21}
 \end{aligned} \tag{3.22}$$

Dla trzeciej ćwiartki z rys. 3.6

$$\begin{aligned} x31 &\leq x35 \leq x33 \\ x31 &\leq x36 \leq x33 \\ y33 &\leq y35 \leq y11 \\ y38 &< x34 \end{aligned} \tag{3.23}$$

Dla czwartek ćwiartki z rys. 3.6

$$\begin{aligned} x41 &\leq x48 \leq x43 \\ x41 &\leq x47 \leq x43 \\ y43 &\leq y47 \leq 411 \\ y46 &> x42 \end{aligned} \tag{3.24}$$

W kolejnym kroku algorytm wyznacza punkty przecięcia. Z racji tego, że nachodzące obszary są prostokątami zrotowanymi pod takim samym kątem, to do ich wyznaczenia pobiera odpowiednie współrzędne już wyznaczonych obszarów.

Dla pierwszej ćwiartki z rys. 3.6

$$\begin{aligned} A &= (x12, y15) \\ B &= (x12, y16) \end{aligned} \tag{3.25}$$

Dla drugiej ćwiartki z rys. 3.6

$$\begin{aligned} C &= (x21, y25) \\ D &= (x21, y28) \end{aligned} \tag{3.26}$$

Dla trzeciej ćwiartki z rys. 3.6

$$\begin{aligned} E &= (x35, y34) \\ F &= (x36, y34) \end{aligned} \tag{3.27}$$

Dla czwartej ćwiartki z rys. 3.6

$$\begin{aligned} G &= (x46, y42) \\ H &= (x45, y42) \end{aligned} \tag{3.28}$$

W ostatnim kroku algorytm wyznacza kontur tak przygotowanej figury, poprzez połączenie współrzędnych w odpowiedniej kolejności. Zostało to przedstawione w poniższym równaniu:

Dla pierwszej ćwiartki z rys. 3.6

$$(x_{11}, y_{11}) - > (x_{12}, y_{12}) - > (x_{12}, y_{15}) - > (x_{16}, y_{16}) - > \\ (x_{17}, y_{17}) - > (x_{12}, y_{16}) - > (x_{13}, y_{13}) - > (x_{14}, y_{14}) \quad (3.29)$$

Dla drugiej ćwiartki z rys. 3.6

$$(x_{21}, y_{21}) - > (x_{22}, y_{22}) - > (x_{23}, y_{23}) - > (x_{24}, y_{24}) - > \\ (x_{21}, y_{28}) - > (x_{28}, y_{28}) - > (x_{25}, y_{25}) - > (x_{21}, y_{25}) \quad (3.30)$$

Dla trzeciej ćwiartki z rys. 3.6

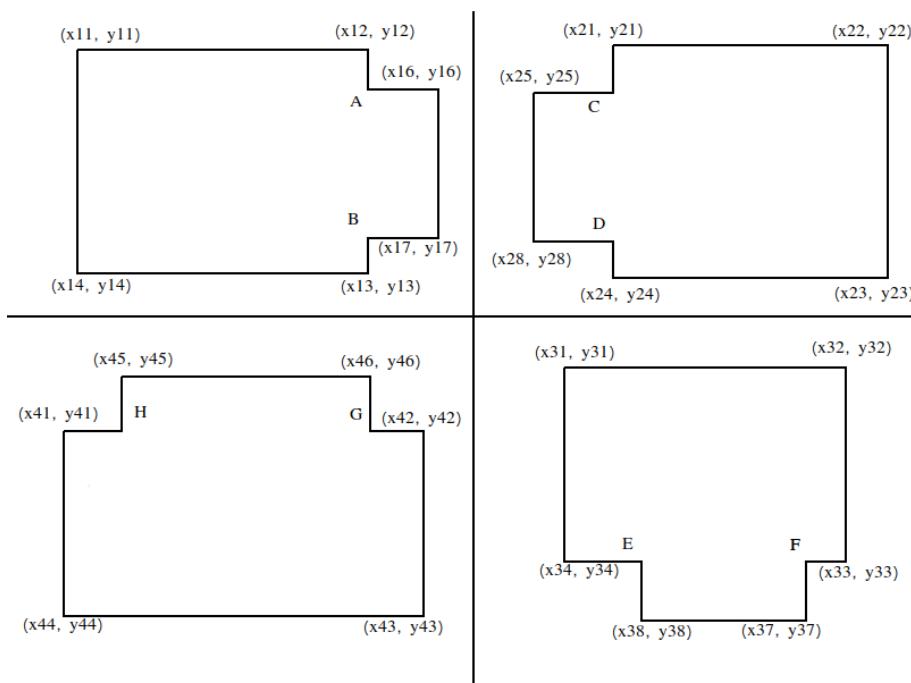
$$(x_{31}, y_{31}) - > (x_{32}, y_{32}) - > (x_{33}, y_{33}) - > (x_{36}, y_{34}) - > \\ (x_{37}, y_{37}) - > (x_{38}, y_{38}) - > (x_{35}, y_{34}) - > (x_{34}, y_{34}) \quad (3.31)$$

Dla czwartej ćwiartki z rys. 3.6

$$(x_{41}, y_{41}) - > (x_{45}, y_{42}) - > (x_{45}, y_{45}) - > (x_{46}, y_{46}) - > \\ (x_{46}, y_{42}) - > (x_{42}, y_{42}) - > (x_{43}, y_{43}) - > (x_{44}, y_{44}) \quad (3.32)$$

W wyniku powyższego algorytmu, zostały wyznaczone kontury nachodzących na siebie obszarów. Zostały przedstawione na rys. 3.7

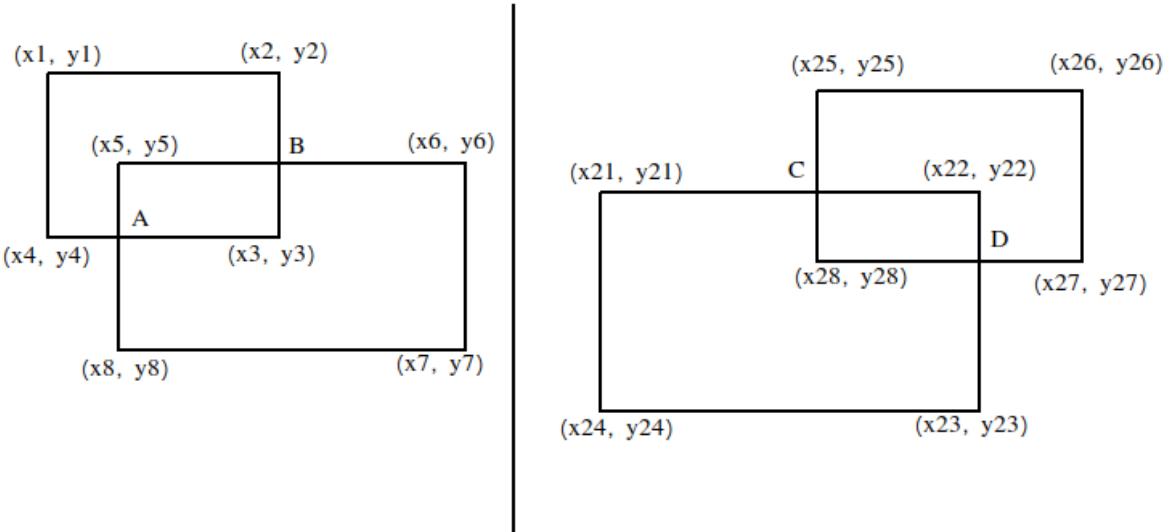
**Rys. 3.7.** Obrys nachodzących na siebie obszarów



### 3.6.3. Łączenie powiększonych obszarów pokrywających w przypadku gdy jeden obszar nachodzi tylko jednym rogiem

Trzecim przypadkiem nachodzenia dwóch obszarów pokrywających jest nachodzenie się jednym rogiem. W takiej sytuacji można rozróżnić dwie możliwości widoczne na rys. 3.8

Rys. 3.8. Nachodzące na siebie obszary



Najpierw należy znaleźć odpowiednie obszary które nachodzą na siebie. W pierwszym przypadku rys. 3.8 obszary muszą spełniać równania:

$$\begin{aligned}
 x8 &\leq x3 \leq x7 \\
 y8 &\leq y3 \leq y6 \\
 x4 &< x8 \\
 y2 &> y6
 \end{aligned} \tag{3.33}$$

Natomiast w drugim przypadku z rys. 3.8:

$$\begin{aligned}
 x28 &\leq x22 \leq x27 \\
 y28 &\leq y22 \leq y25 \\
 x21 &< x25 \\
 y23 &< y28
 \end{aligned} \tag{3.34}$$

W kolejnym kroku algorytm wyznacza punkt przecięcia obu powierzchni. Z racji tego, że nachodzące obszary są prostokątami zrotowanymi pod takim samym kątem, to do ich wyznaczenia pobiera odpowiednie współrzędne już wyznaczonych obszarów. Dla pierwszego przypadku z rys. 3.8 punkty przecięcia A i B wynoszą:

$$A = (x8, y3) // B = (x3, y6) \quad (3.35)$$

Oraz dla drugiego przypadku:

$$C = (x28, y21) // D = (x22, y28) \quad (3.36)$$

W końcowej fazie algorytm wyznacza kontur nachodzących obszarów. W pierwszym przypadku kolejność współrzędnych konturu wygląda następująco:

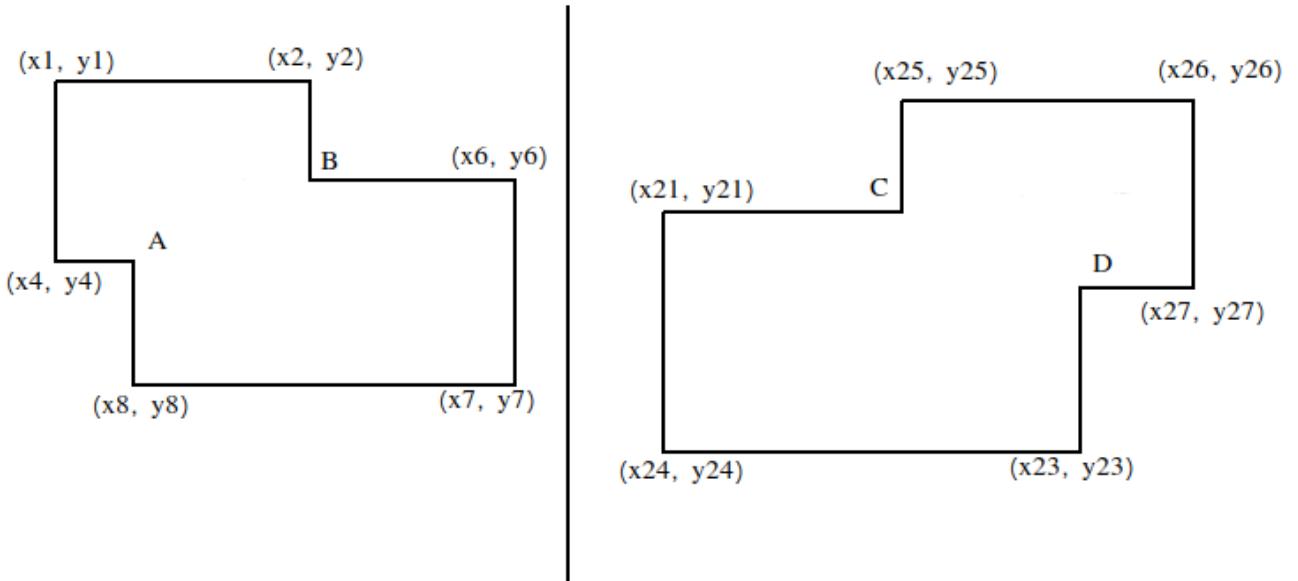
$$\begin{aligned} (x1, y1) - > (x2, y2) - > (x3, y6) - > (x6, y6) - > \\ (x7, y7) - > (x8, y8) - > (x8, y3) - > (x4, y4) \end{aligned} \quad (3.37)$$

A w drugim:

$$\begin{aligned} (x21, y21) - > (x28, y21) - > (x25, y25) - > (x26, y26) - > \\ (x27, y27) - > (x22, y28) - > (x23, y23) - > (x24, y24) \end{aligned} \quad (3.38)$$

Wynik powyższych kroków został przedstawiony na rys. 3.9

**Rys. 3.9.** Kontur nachodzących na siebie obszarów



### 3.7. Znajdowanie punktów przecięcia drogi i powiększonego obszaru

W celu znalezienia punktów przecięcia, program wykorzystuje fakt, że droga reprezentowana jest przez zbiór odcinków.

W pierwszej kolejności algorytm iteruje po zbiorze odcinków. Każdy odcinek lub bok obszaru reprezentowany jest przez dwie współrzędne:

$$\begin{aligned} & (x_a, y_a) \\ & (x_b, y_b) \end{aligned} \quad (3.39)$$

Dzięki temu, bez problemu można określić równanie prostej przechodzącej przez te dwa punkty:

$$(y - y_a)(x_b - x_a) - (y_b - y_a)(x - x_a) = 0 \quad (3.40)$$

Oraz równanie w postaci kierunkowej:

$$y = \frac{y_a - y_b}{x_a - x_b} x + (y_a - \frac{y_a - y_b}{x_a - x_b} x_a) \quad (3.41)$$

W celu wyznaczenia współrzędnej x punktu przecięcia wystarczy porównać oba równania:

$$\frac{y_c - y_d}{x_c - x_d} x + (y_c - \frac{y_c - y_d}{x_c - x_d} x_c) = \frac{y_a - y_b}{x_a - x_b} x + (y_a - \frac{y_a - y_b}{x_a - x_b} x_a) \quad (3.42)$$

W wyniku czego otrzymujemy:

$$x = \frac{(y_a - \frac{y_a - y_b}{x_a - x_b} x_a) - (y_c - \frac{y_c - y_d}{x_c - x_d} x_c)}{\frac{y_c - y_d}{x_c - x_d} - \frac{y_a - y_b}{x_a - x_b}} \quad (3.43)$$

Aby wyznaczyć współrzędną y, należy przekształcić równanie 3.41 do postaci:

$$x = \frac{y - (y_a - \frac{y_a - y_b}{x_a - x_b} x_a)}{\frac{y_a - y_b}{x_a - x_b}} \quad (3.44)$$

Następnie porównać równania obu prostych:

$$\frac{y - (y_a - \frac{y_a - y_b}{x_a - x_b} x_a)}{\frac{y_a - y_b}{x_a - x_b}} = \frac{y - (y_c - \frac{y_c - y_d}{x_c - x_d} x_c)}{\frac{y_c - y_d}{x_c - x_d}} \quad (3.45)$$

W wyniku czego otrzymujemy wzór na współrzędną y przecinającą obie proste:

$$y = \frac{(y_a - \frac{y_a - y_b}{x_a - x_b} x_a)(\frac{y_c - y_d}{x_c - x_d}) - (\frac{y_a - y_b}{x_a - x_b})(y_c - \frac{y_c - y_d}{x_c - x_d} x_c)}{(\frac{y_c - y_d}{x_c - x_d})(\frac{y_a - y_b}{x_a - x_b})} \quad (3.46)$$

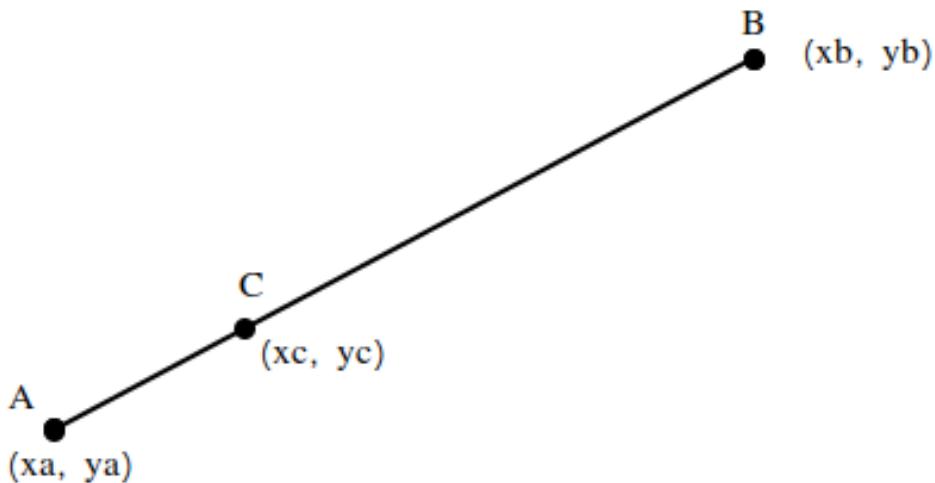
### 3.8. Sprawdzanie, czy punkt przecięcia należy do odcinka

W celu sprawdzenia, czy punkt przecięcia należy do odcinka, należy posłużyć się własnością, że suma długości mierzonej od początku odcinka do danego punktu oraz od danego punktu, do końca odcinka jest równa całkowitej długości odcinka.

$$|AC| + |CB| = |AB| \quad (3.47)$$

W celu lepszego zobrazowania problemu, skorzystam z rysunku 3.10

Rys. 3.10. Punkt wewnętrzny odcinka



Odległość między dwoma punktami a i b wynosi:

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (3.48)$$

Długość odcinka AC wynosi:

$$d_{AC} = \sqrt{(xa - xc)^2 + (ya - yc)^2} \quad (3.49)$$

Długość odcinka CB wynosi:

$$d_{CB} = \sqrt{(xc - xb)^2 + (yc - yb)^2} \quad (3.50)$$

Oraz długość odcinka AB wynosi:

$$d_{AB} = \sqrt{(xa - xb)^2 + (ya - yb)^2} \quad (3.51)$$

Zgodnie z równaniem 3.47, aby punkt należał do odcinka, musi spełniać warunek:

$$\sqrt{(xa - xb)^2 + (ya - yb)^2} = \sqrt{(xa - xb)^2 + (ya - yb)^2} + \sqrt{(xc - xb)^2 + (yc - yb)^2} \quad (3.52)$$

### **3.9. Przyporządkowanie obiektów reprezentowanych przez wielokąty, do poszczególnych dróg**

W niniejszej sekcji skupię się na rozwiązaniu problemu przyporządkowania obiektów reprezentowanych przez wielokątny do poszczególnych dróg. Wykorzystywane jest w sytuacjach, gdy trzeba określić dokładne współrzędne początku i końca strefy, na której obowiązuje ograniczonej prędkości. Obiekty na mapie, reprezentowane przez wielokąty:

- szkoły
- parki
- place zabaw
- przystanki autobusowe i tramwajowe
- sklepy
- miejsca kultów religijnych

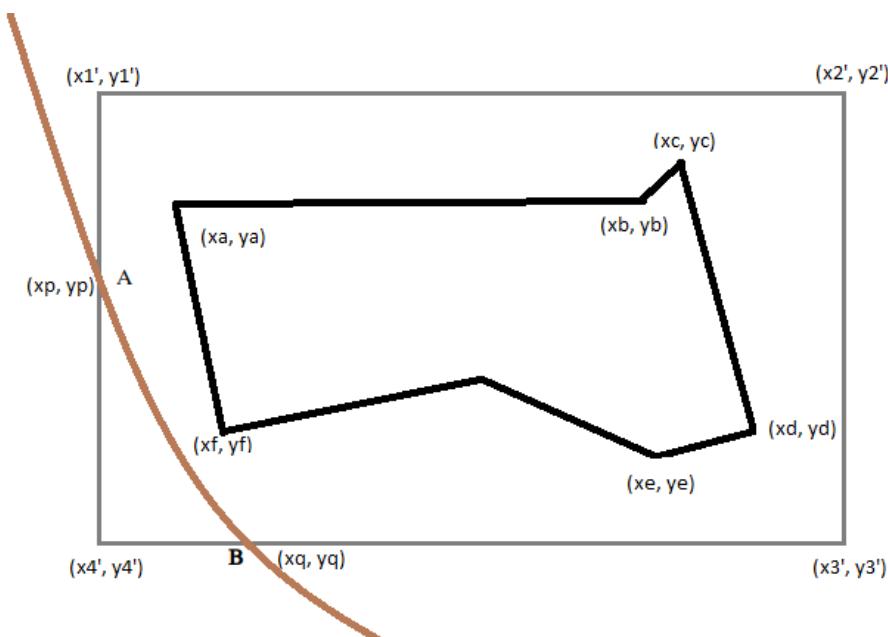
Algorytm przyporządkowania obiektów reprezentowanych przez wielokąty do poszczególnych dróg wygląda następująco.

1. W pierwszej kolejności algorytm znajduje minimalny obszar pokrywający (eng. minimum bounding box) dany obiekt. Dokładny opis został przedstawiony w sekcji 3.4
2. Następnie zostaje powiększony obszar wyznaczony w poprzednim kroku, w celu poszerzenia strefy ograniczonej prędkości. Szczegóły znajdują się w sekcji 3.5
3. Po wykonaniu powyższych operacji, w celu optymalizacji algorytmu, następuje łączenie nachodzących na siebie powiększonych obszarów. Zostało dokładnie omówione w sekcji 3.6

4. Kolejnym krokiem jest znalezienie punktu przecięcia drogi z powiększonym obszarem. Etap ten został podzielony na dwie części:
- W pierwszej kolejności znajdujemy punkt przecięcia drogi i powiększonego obszaru. Opis w sekcji 3.7
  - Następnie sprawdzamy czy znaleziony punkt zawiera się w interesującej nas drodze. Szczegóły znajdują się w sekcji 3.8
5. Gdy został już wyliczony punkt przecięcia drogi i powiększonego obszaru, następuje sprawdzenie czy ten punkt jest początkiem, czy końcem strefy ograniczonej prędkości. Etap ten został podzielony na dwie części
- Najpierw obliczane zostają współrzędne punktu na drodze znajdującego się 1 metr od punktu przecięcia w kierunku zgodnym z ruchem jazdy. Do tego celu został wykorzystany wzór z rozdziału 3.3.
  - Dla wyznaczonego punktu sprawdzane jest, czy znajduje on w powiększonym obszarze pokrywającym.
6. Jeśli wyznaczony punkt zawiera się w danym obszarze, to znaczy że punkt przecięcia jest początkiem strefy ograniczonej prędkości
7. W przeciwnym wypadku punkt przecięcia jest zakończeniem strefy ograniczonej prędkości.

Na rys. 3.11 została przedstawiona droga przebiegająca przez strefę ograniczonej prędkości. Punktem A został zaznaczony początek strefy, natomiast punktem B, jej koniec.

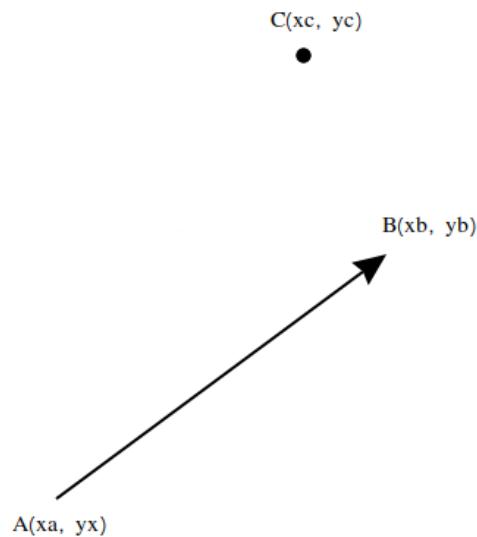
Rys. 3.11. Droga przebiegająca przez wybrany obszar



### 3.10. Obliczanie, po której stronie drogi znajduje się konkretny punkt

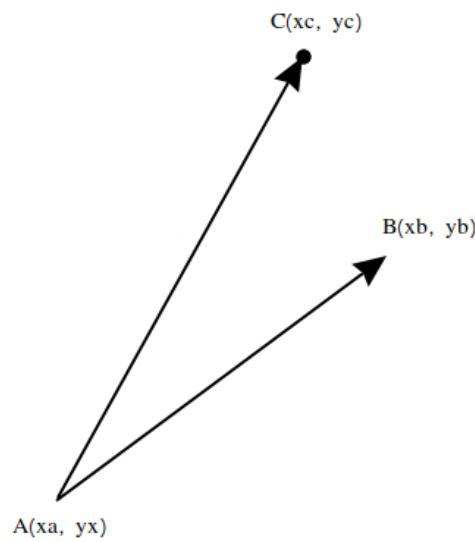
Algorytm obliczania po której stronie odcinka znajduje się dany punkt został opracowany następująco. Odcinek reprezentujący drogę posiada swój kierunek, dlatego traktowany jest jako wektor AB. Opisana sytuacja została przedstawiona na rysunku 3.12

**Rys. 3.12.** Vektor reprezentujący odcinek drogi i punkt reprezentujący zakończenie następnego odcinka drogi



W celu obliczenia, po której stronie wektora znajduje się dany punkt, został utworzony wektor o początkowej współrzędnej równej początkowej współrzędnej wektora AB. Sytuacja została przedstawiona na rys. 3.13

**Rys. 3.13.** Wektor reprezentujący odcinek drogi i wektor



Współrzędne wektora AB wynoszą:

$$AB = (xb - xa, yb - ya, 0) \quad (3.53)$$

Oraz współrzędne wektora AC wynoszą:

$$AC = (xc - xa, yc - ya, 0) \quad (3.54)$$

Mając podane współrzędne obu wektorów, można wyliczyć iloczyn wektorowy:  $AB \times AC$ :

$$AB \times AC = (0, 0, (xb - xa) * (yc - ya) - (yb - ya) * (xc - xa)) \quad (3.55)$$

gdzie wartość  $xa * yb - xb * ya$  określa po której stronie wektora AB punkt C się znajduje w zależności od jej znaku.

### 3.11. Wyznaczanie promienia skrętu dla zakrótów danej drogi

Ostatnim czynnikiem wpływającym na algorytm wyznaczania dopuszczalnej prędkości jest promień skrętu danego odcinka drogi. Jak zostało opisane w poprzednich rozdziałach OpenStreetMap przedstawia drogę jako zbiór odcinków, dlatego algorytm wygląda następująco:

1. Pobierany jest pierwszy i drugi odcinek drogi.
2. Zostaje określony, w którą stronę skierowany jest zakrót - szczegółowo w rozdziale 3.10
3. Zapisywane są kolejne odcinki drogi skierowanej wszą samą stronę
4. Następnie zostaje powtórzony krok 3. dopóki:
  - nie kończy się droga
  - odcinek drogi jest dłuższy niż 30 metrów
  - droga skręca w innym kierunku
5. W przypadku gdy pierwszy lub ostatni odcinek są dłuższe niż 30 metrów, zostają skrócone do 30 metrów.

Mając wyznaczony promień skrętu, algorytm obniża dopuszczalną prędkość:

- o 10 km/h w przypadku gdy promień skrętu jest z przedziału między 50 a 100 metrów
- o 20 km/h w przypadku gdy promień skrętu jest z przedziału między 100 a 200 metrów
- o 30 km/h w przypadku gdy promień skrętu jest powyżej 200 metrów

## **4. Algorytm - poszczególne składowe oraz przykłady zastosowania**

### **4.1. Typ nawierzchni**

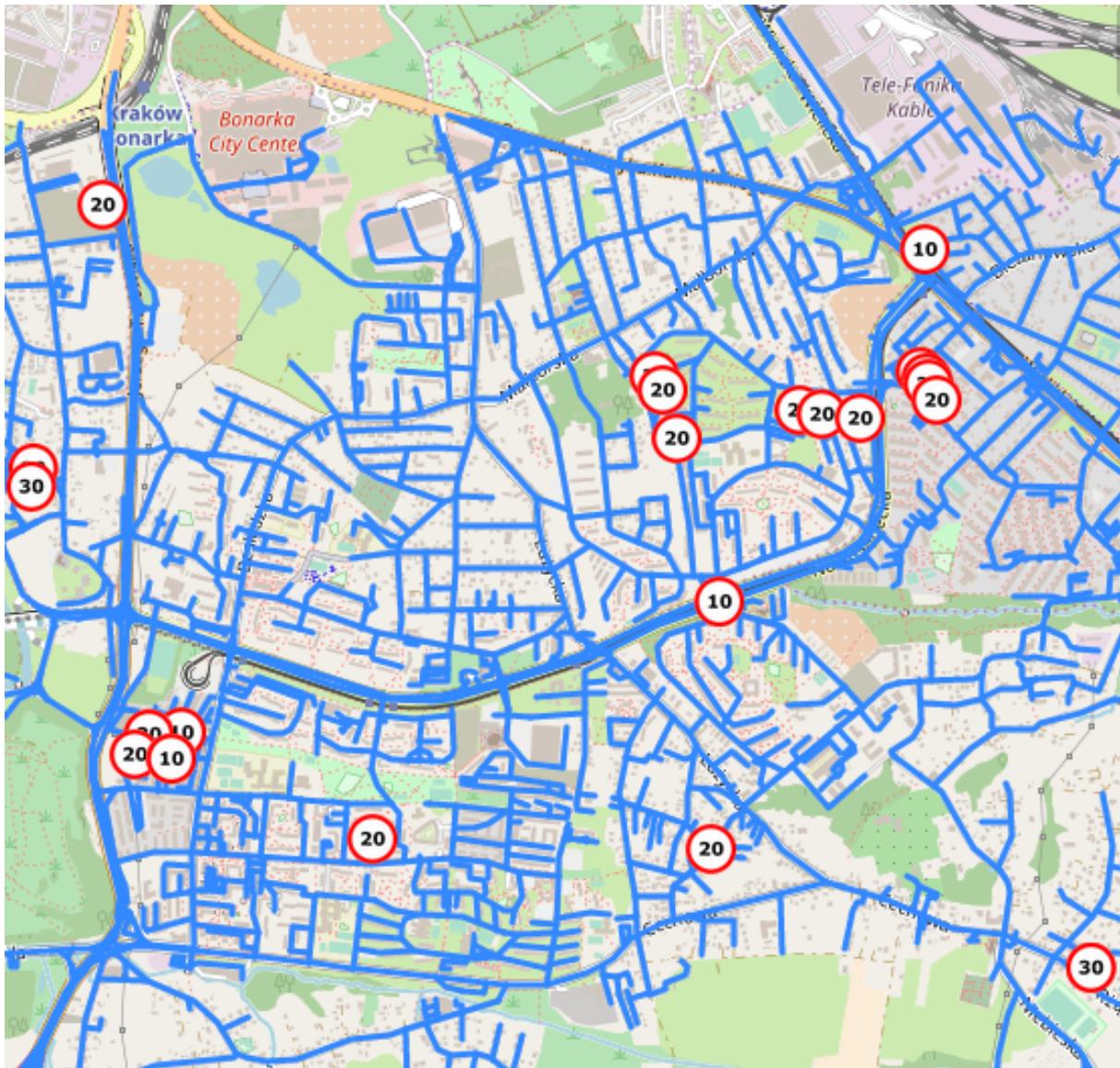
W celu zadbania o bezpieczeństwo osób, ale również o dobrą kondycję techniczną pojazdów poruszających się po drogach, niezbędne jest uwzględnienie typu nawierzchni. Nie można dopuścić do sytuacji, gdy na nawierzchni składającej się głównie ze żwiru, znajdowało się znak ograniczenia prędkości o wysokiej wartości. Wtedy ulec awarii może zarówno zawieszenie, jak również jadące przed nimi pojazdy. Aby zapobiec tego typu problemom, algorytm dzieli typ nawierzchni na kilka rodzajów:

- kostka brukowa
- żwir
- drobny żwir
- nieutwardzona
- błotnistą
- płyty betonowe
- droga gruntowa
- piasek
- asfalt

Najbardziej problematyczna dla kierowców droga to taka, która pokryta jest żwirem, drobnym żwirem, składającą się z piasku lub jest błotnistą. W takich przypadkach ograniczenie prędkości wynosi 10 km/h. Niewiele lepsza nawierzchnia to taka, która wyłożona jest zarówno kostką brukową oraz płytami betonowymi. Dla nich, odpowiednia prędkość wynosi 20 km/h. W przypadku drogi nieutwardzonej oraz gruntowej, ograniczenie prędkości wynosi 30 km/h. Dla asfaltu, ze względu na jego strukturę, ograniczenie prędkości praktycznie nie występuje.

Na Rys. 4.1 zostały umieszczone ograniczenia prędkości dla dróg, których nawierzchnia pokryta jest materiałem innym niż asfalt. Dla celów demonstracyjnych, został on specjalnie pominięty, ponieważ większość dróg jest nim pokryta, przez co Rys. 4.1 stałby się mało czytelny. Oczywiście ogólny algorytm uwzględnia asfalt.

Rys. 4.1. Ograniczenia prędkości ze względu na rodzaj nawierzchni.



## 4.2. Przejścia dla pieszych

### 4.2.1. Przyporządkowywanie przejść dla pieszych do poszczególnych dróg

Bardzo ważnym czynnikiem doboru prędkości jest obecność przejść dla pieszych. Te z sygnalizacją świetlną nie stanowią problemu, ponieważ ruch pieszych poruszających się na nich jest ograniczony tylko do sytuacji, gdy sygnalizacja świeci się na zielono. W przypadku przejść bez sygnalizacji, sprawą się komplikuje, ponieważ kierowca jest zobowiązany do zachowania szczególnej ostrożności i zmniejszenia prędkości od 30 km/h.

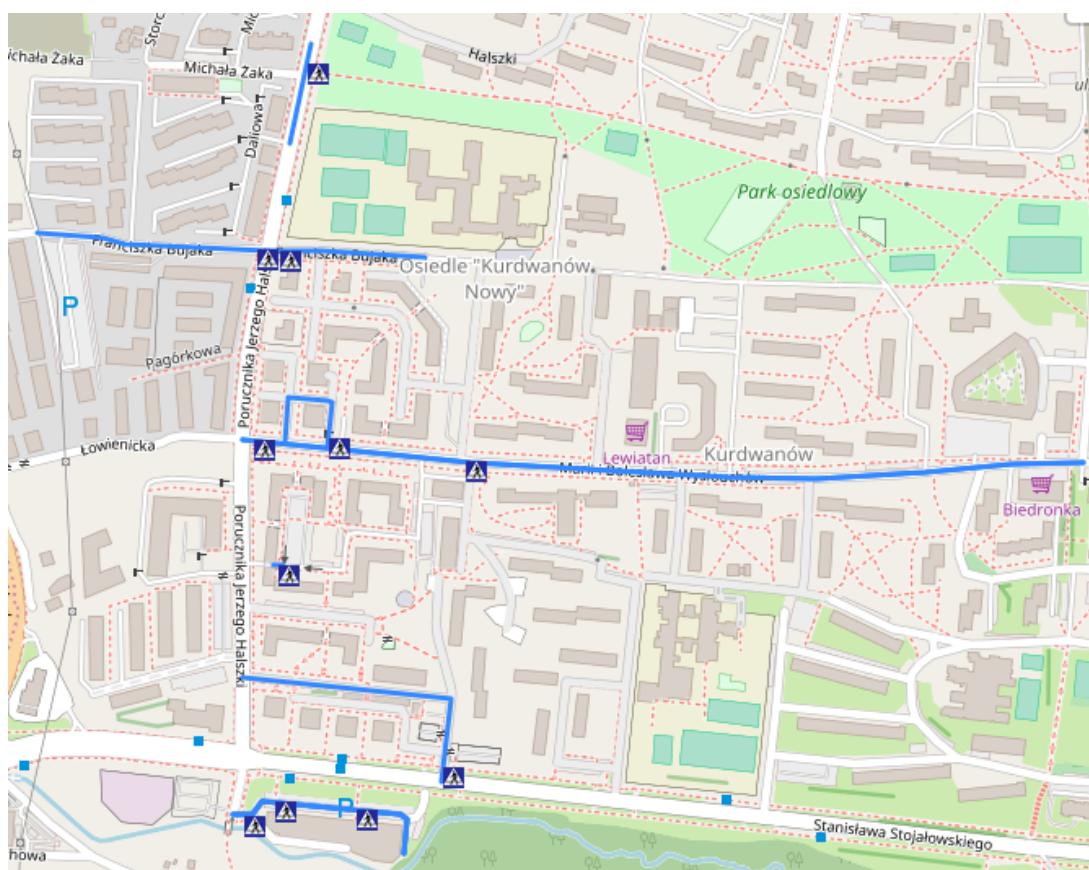
Do przyporządkowania przejść dla pieszych, do poszczególnych dróg, został wykorzystany wzór 3.1 na odległość punktu od prostej, przedstawionym w sekcji 3.2.

Rezultatem wdrożenia powyższego wzoru do programu, są:

- na niebiesko zaznaczone drogi, na których znajdują się przejścia dla pieszych
- znakiem "D-6" zostały oznaczone przejścia dla pieszych

Wynik został przedstawiony na Rys. 4.2:

Rys. 4.2. Drogi na których znajdują się przejścia dla pieszych.



Dzięki tak zobrazowanej sytuacji, można ocenić skuteczność algorytmu przyporządkowującemu przejścia dla pieszych do określonych dróg.

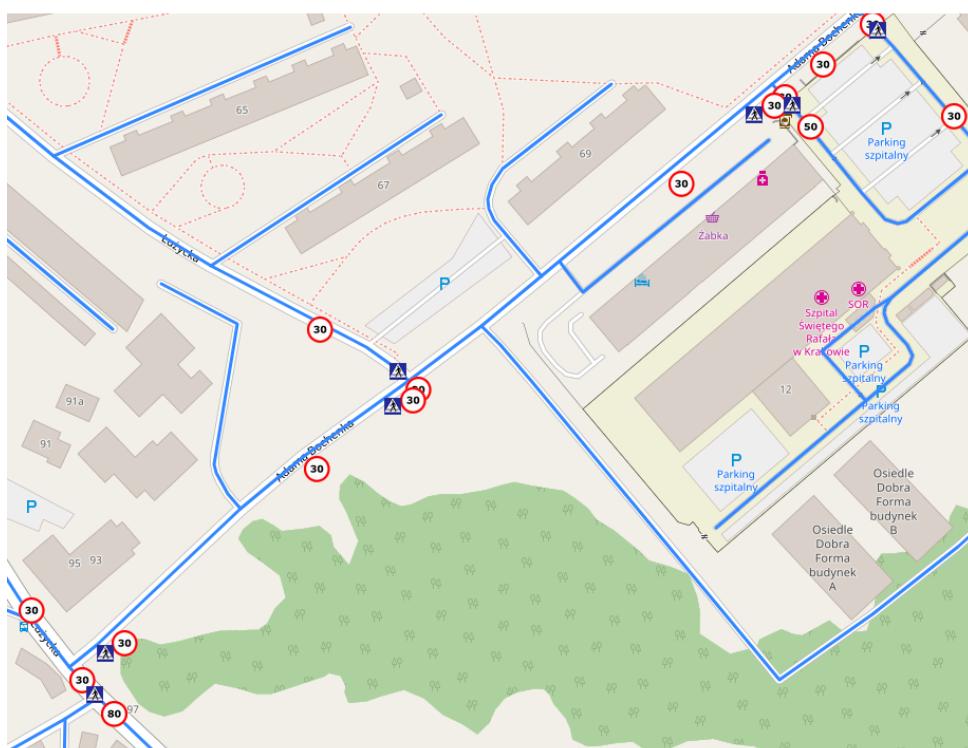
#### 4.2.2. Wyznaczanie prędkości i umieszczanie jej w odpowiednim miejscu na mapie

Bezpieczna prędkość w pobliżu nie oznakowanych przejść dla pieszych wynosi ok. 30 km/h. Zapewnia ona zarówno wystarczający czas reakcji, odpowiednio krótką drogę hamowania oraz zmniejsza ryzyko wystąpień potrąceń pieszych.

Algorytm umieszcza znaki ograniczenia prędkości:

- w przypadku gdy maksymalna prędkość na drodze jest mniejsza bądź równa 30 km/h, nie ma sensu wstawiać znaku
- w odległości 50 m od przejścia, gdy maksymalna prędkość na drodze jest mniejsza bądź równa 60 km/h
- w odległości 150 m od przejścia, gdy maksymalna prędkość przekracza 60 km/h
- w przypadku, gdy przejście dla pieszych znajduje się w odległości mniejszej niż 50m lub 150m (w zależności od maksymalnej prędkości), znak zostanie umieszczony na początku drogi
- bezpośrednio za przejściem zostanie ustawiony znak przywracająca poprzednie ograniczenie prędkości, za wyjątkiem sytuacji, gdy droga za przejściem dla pieszych jest krótsza niż 100m. W takim wypadku, nie ma sensu zmieniać prędkości.

**Rys. 4.3.** Ograniczenia prędkości przy przejściach dla pieszych.

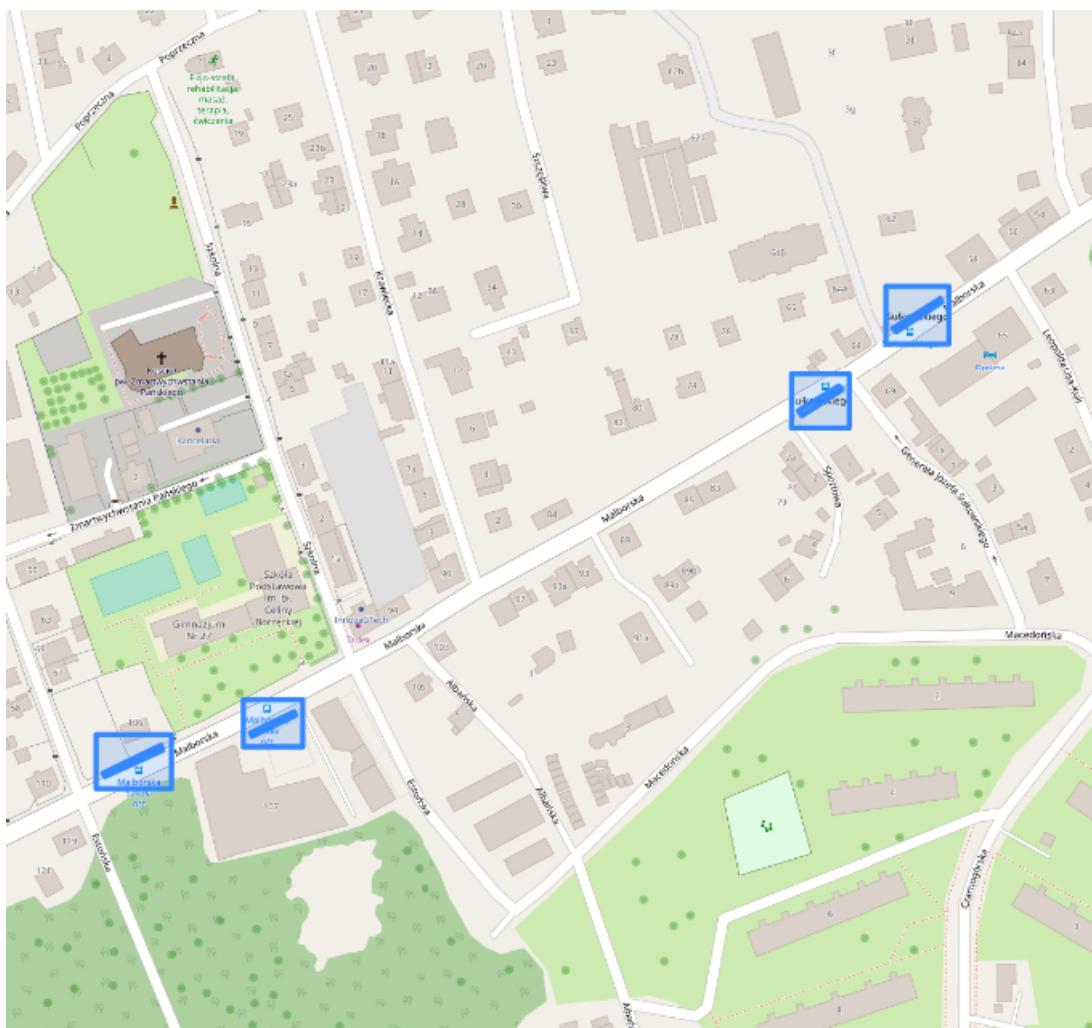


### 4.3. Przystanki autobusowe i tramwajowe

Kolejnymi obiektami, uwzględnionymi przez algorytm są przystanki autobusowe i tramwajowe. W ich pobliżu przeważnie znajduje się dość duża grupa ludzi w różnym przedziale wieku. Ponadto zdarzają się sytuacje, że piesi wbiegają na drogę w celu zdążenia na komunikację miejską. Ze względu na takie zachowanie, algorytm ogranicza prędkość przy przystankach autobusowych i tramwajowych do 30 km/h.

Na rys. 4.4 zostały przedstawione przystanki autobusowe i tramwajowe. Wokół nich znajdują się powiększone o 5 metrów obszary pokrywający te obiekty.

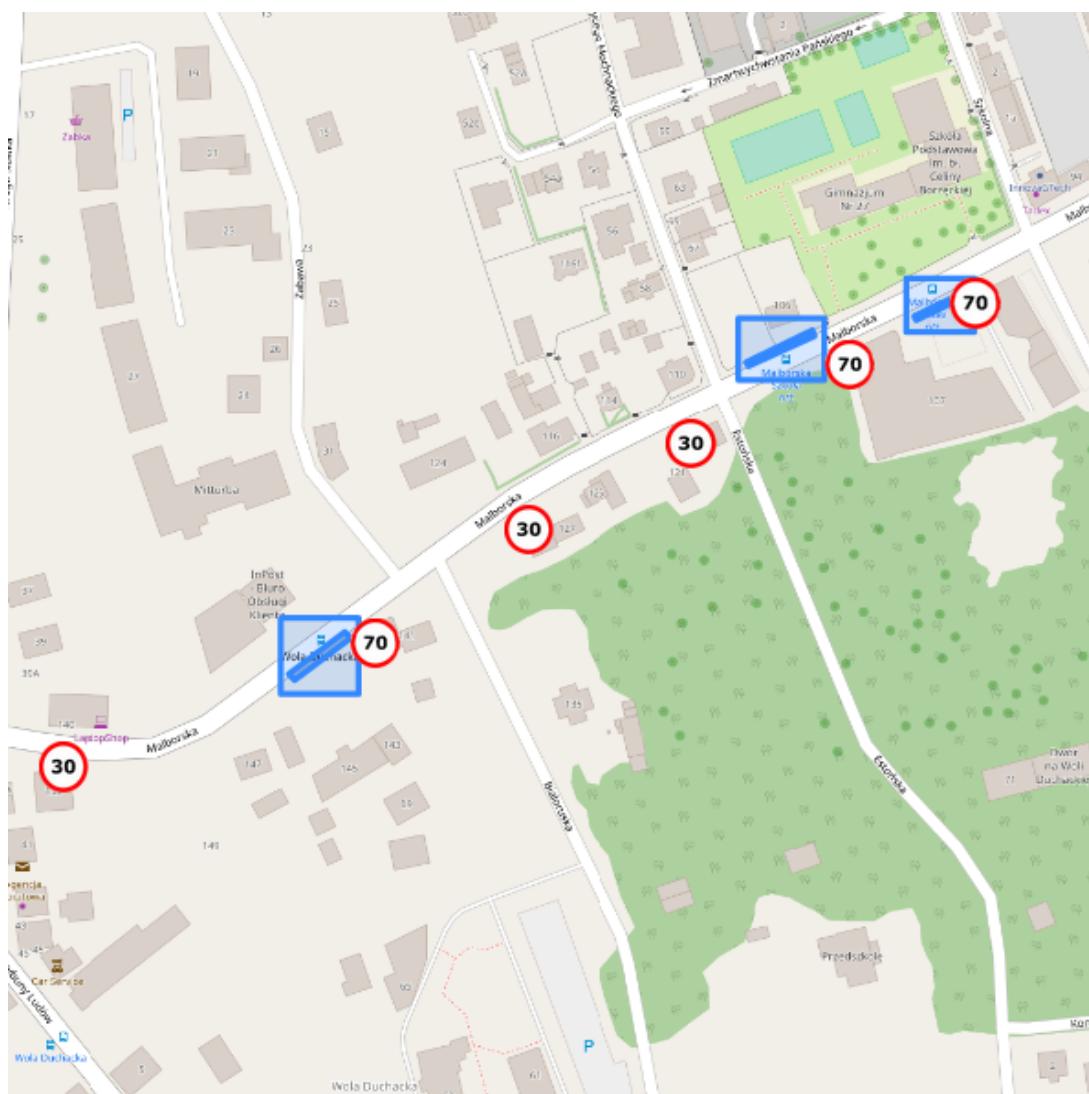
Rys. 4.4. Ograniczenie prędkości przed i za światłami drogowymi



#### 4.3.1. Wyznaczanie prędkości i umieszczanie jej w odpowiednim miejscu na mapie

Najczęściej przystanki autobusowe i tramwajowe znajdują się na drogach o niezbyt wysokiej dopuszczalnej prędkości. W przypadku gdy dopuszczalna prędkość na drodze nie przekracza 30 km/h. nie ma sensu stawiać znaku. W przypadku gdy ograniczenie prędkości na drodze nie przekracza 60 km/h, znak zostanie postawiony w odległości 50 metrów od początku powiększonego obszaru wokół przystanku. Gdy ograniczenie prędkości przekracza 60 km/h, znak zostaje ustawiony w odległości 150 metrów od początku obszaru. Znak przywracający poprzednią prędkość, algorytm umieszcza zaraz za obszarem stanowiącym przystanek. Opisana sytuacja została przedstawiona na rys. 4.5

Rys. 4.5. Rozmieszczenie znaków w okolicy przystanków autobusowych



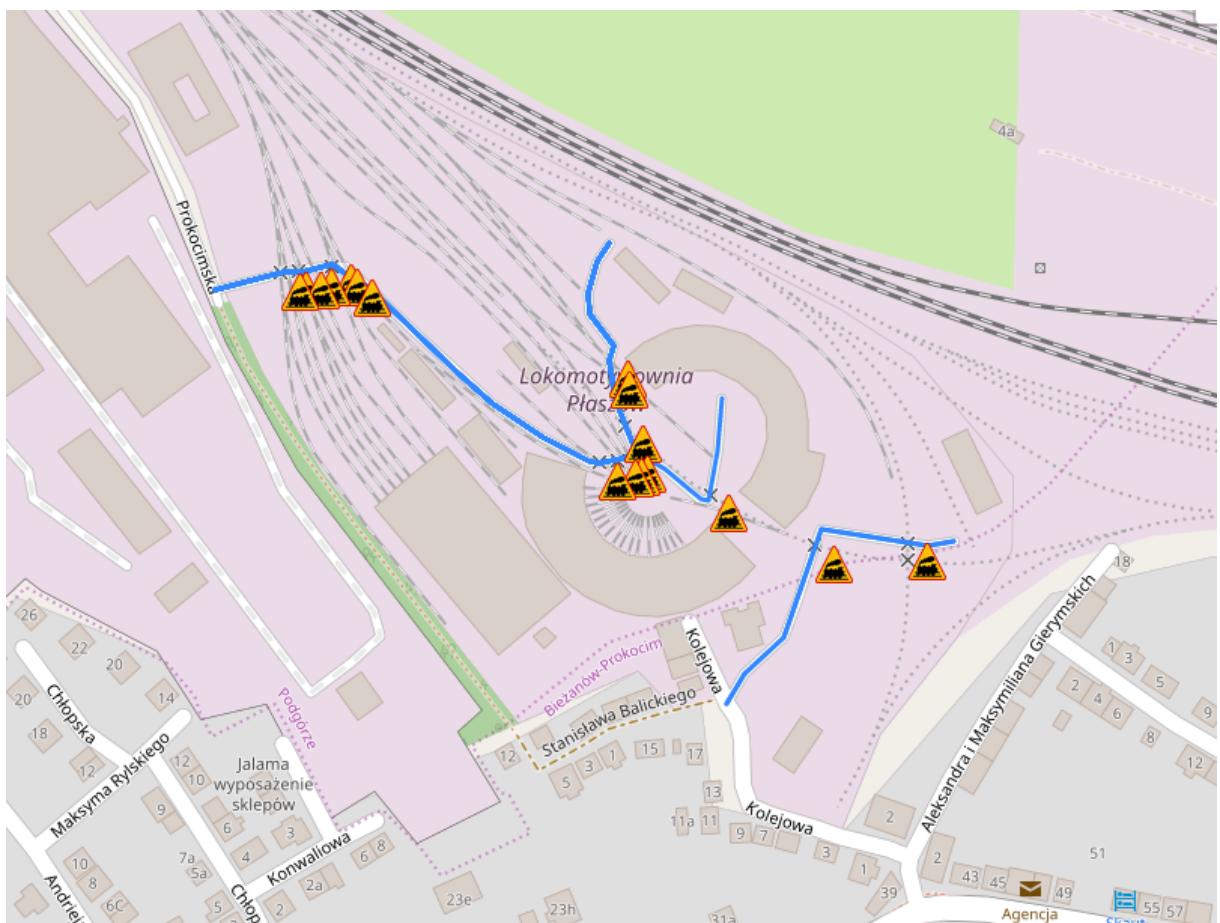
## 4.4. Przejazdy kolejowe

### 4.4.1. Przyporządkowywanie przejazdów kolejowych do poszczególnych dróg

Istotnym parametrem algorytmu wyznaczającego dopuszczalne prędkości jest obecność przejazdów kolejowych. Jak wiadomo, pociąg nie zatrzyma się w miejscu. Jego droga hamowania w głównej mierze zależy od masy oraz prędkości z jaką się porusza. Dla przykładu, pociąg towarowy o masie ok. 1800 ton, jadący z prędkością ok. 50 km/h, zatrzyma się po około 500 m. Dlatego ważne jest określenie prędkości, z jaką samochód może się przemieszczać przed takim przejazdem.

Do przyporządkowania przejazdów kolejowych do poszczególnych dróg, został wykorzystany wzór 3.1 znajdujący się w rozdziale 4.2

Rys. 4.6. Drogi na których znajdują się przejazdy kolejowe.



Rys. 4.6 obrazuje wynik przypisania przejazdów kolejowych do poszczególnych dróg:

- kolorem niebieskim drogi, na których znajdują się przejazdy kolejowe
- znakiem "A-10" zostały oznaczone przejazdy kolejowe, pobrane z OpenStreetMap

#### 4.4.2. Wyznaczanie prędkości i umieszczanie jej w odpowiednim miejscu na mapie

Podobnie jak miało to miejsce w rozdziale 4.2, umiejscowienie znaków przed przejazdem będzie zależało od kilku czynników:

- w przypadku gdy maksymalna prędkość na drodze jest mniejsza bądź równe 30 km/h, nie ma sensu wstawiać znaku
- na drodze z ograniczeniem prędkości do 60 km/h, znak zostanie umieszczony 50m przed przejazdem kolejowym
- w przypadku prędkości powyżej 60 km/h, znak zostanie umieszczony w odległości 150m przed przejazdem kolejowym
- bezpośrednio za przejazdem zostanie ustawiony znak przywracająca poprzednie ograniczenie prędkości, za wyjątkiem sytuacji, gdy droga za przejazdem kolejowym jest krótsza niż 100m. W takim wypadku, nie ma sensu zmieniać prędkości.

Rys. 4.7 obrazuje przejazd kolejowy znajdujący się na dwukierunkowej drodze, na której obowiązuje ograniczenie prędkości do 80 km/h. Dlatego znaki 30 km/h zostały umieszczone 150m przed przejazdem, a zaraz po nim znaki przywracające poprzednią prędkość 80 km/h. Znaki są po obu stronach, gdyż jest to droga dwukierunkowa

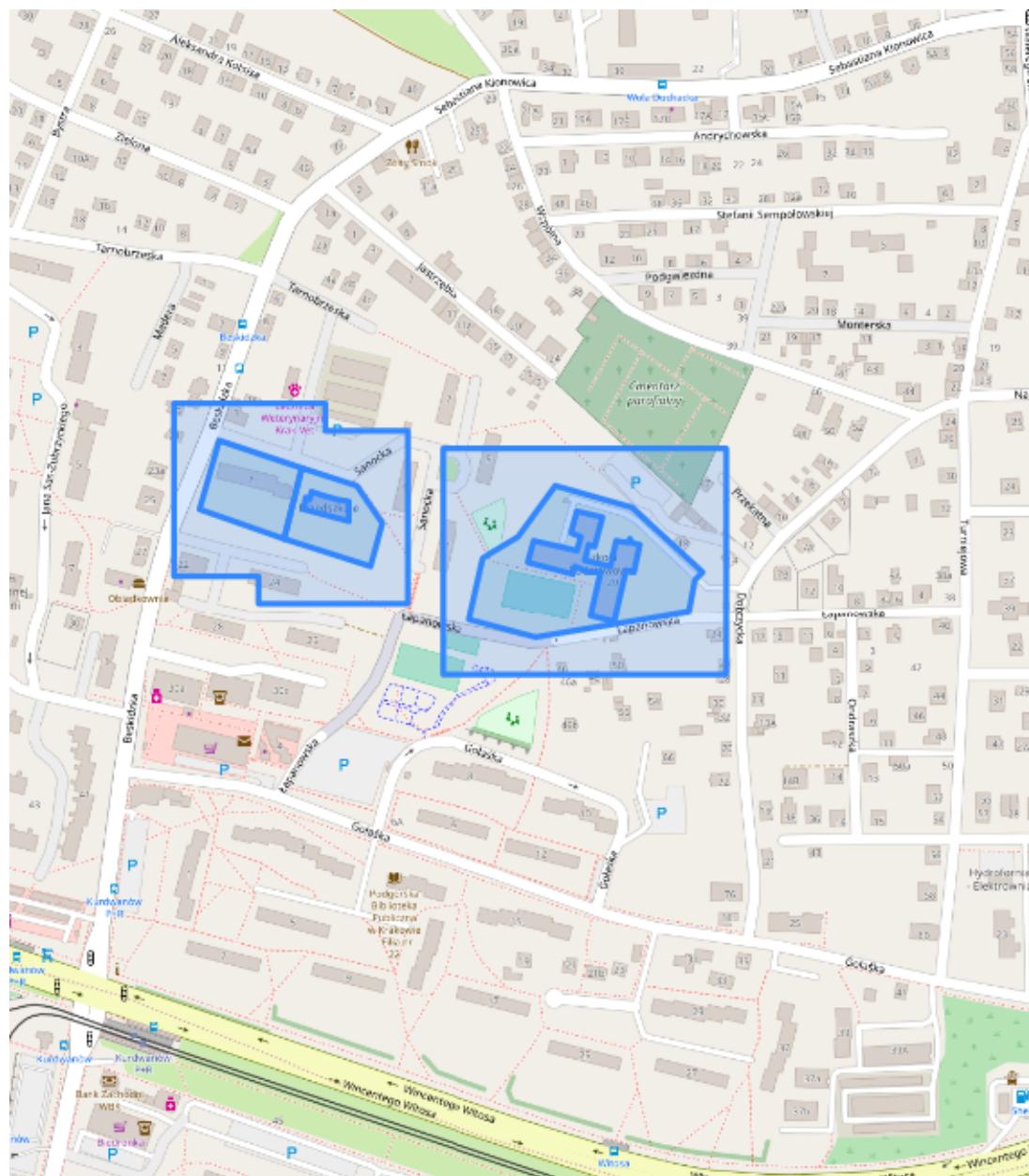
**Rys. 4.7.** Umiejscowienie znaków przed i za przejazdem kolejowym.



## 4.5. Szkoły i miejsca zabaw

Dopuszczalna prędkość, z jaką pojazdy mogą się przemieszczać w pobliżu szkół, placów zabaw lub innych miejsc, przy których mogą znajdować się osoby niepełnoletnie, wynosi 30 km/h. Jest to niezbędne minimum, aby kierowca zdążył zareagować na czas. Na rys. 4.8 po lewej stronie zostało przedstawione przedszkole z placem zabaw przylegającym do niego. Natomiast po prawej stronie znajduje się szkoła podstawowa oraz otoczony wokół niej teren. Jak widać, zostały zaznaczone minimalnym obszarem pokrywającym, powiększonym dodatkowo o 30 metrów z każdej strony

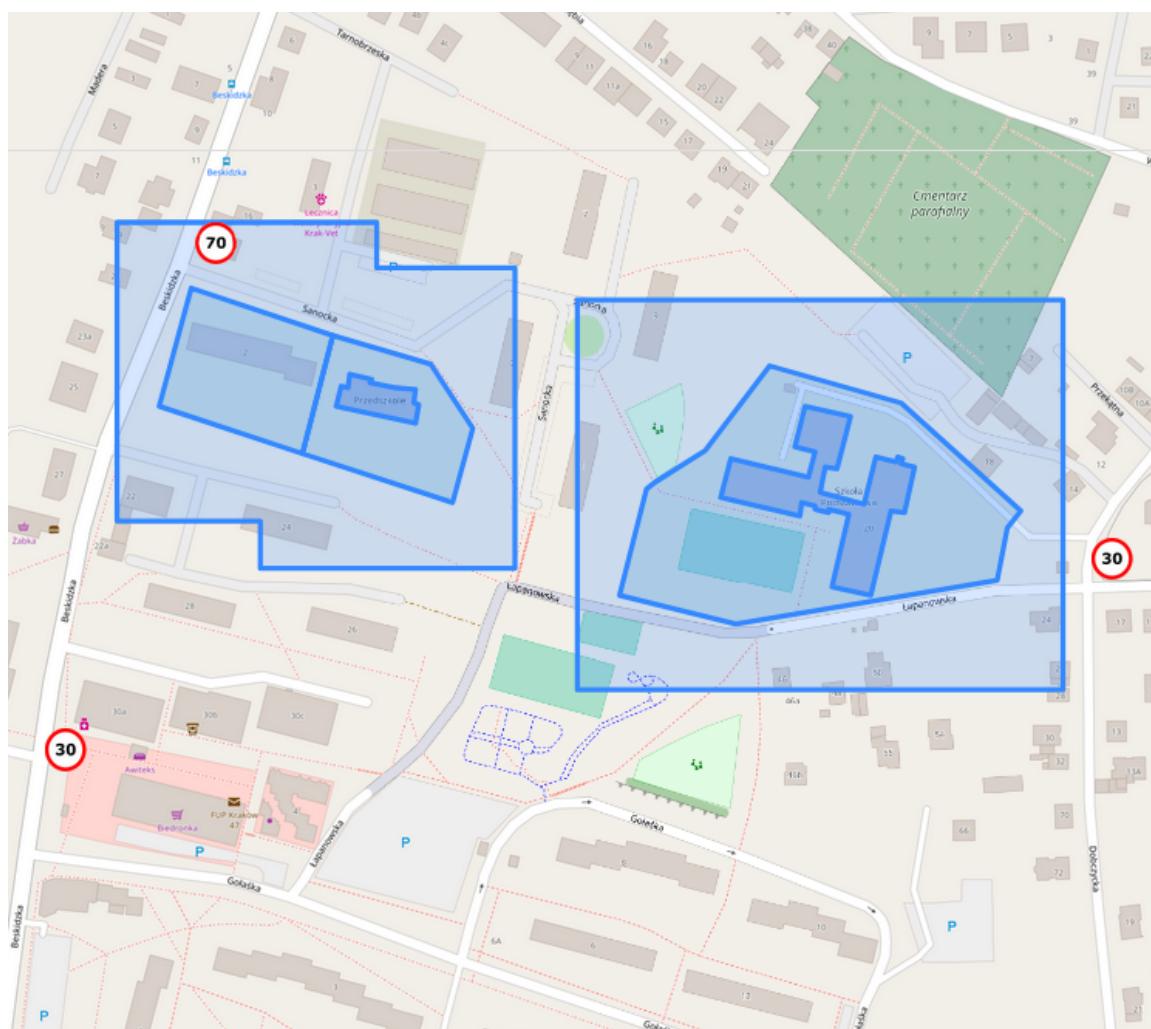
Rys. 4.8. Szkoły i miejsca zabaw



#### 4.5.1. Wyznaczanie prędkości i umieszczanie jej w odpowiednim miejscu na mapie

Znaki ograniczające dopuszczalną prędkość znajdują się w odległości 50 metrów, w przypadku gdy szkoła, znajduje się w pobliżu drogi z ograniczeniem prędkości do 60 km/h. Powyżej tej prędkości znaki znajdują się umieszczone w odległości 150m. Jest ono umieszczane tylko wtedy, gdy ograniczenie prędkości na drodze jest większe niż 30 km/h. Znak przywracający poprzednie ograniczenia prędkości jest umieszczany bezpośrednio po obszarze w którym znajduje się szkoła. Zostało to przedstawione na rys. 4.9.

Rys. 4.9. Szkoły i miejsca zabaw

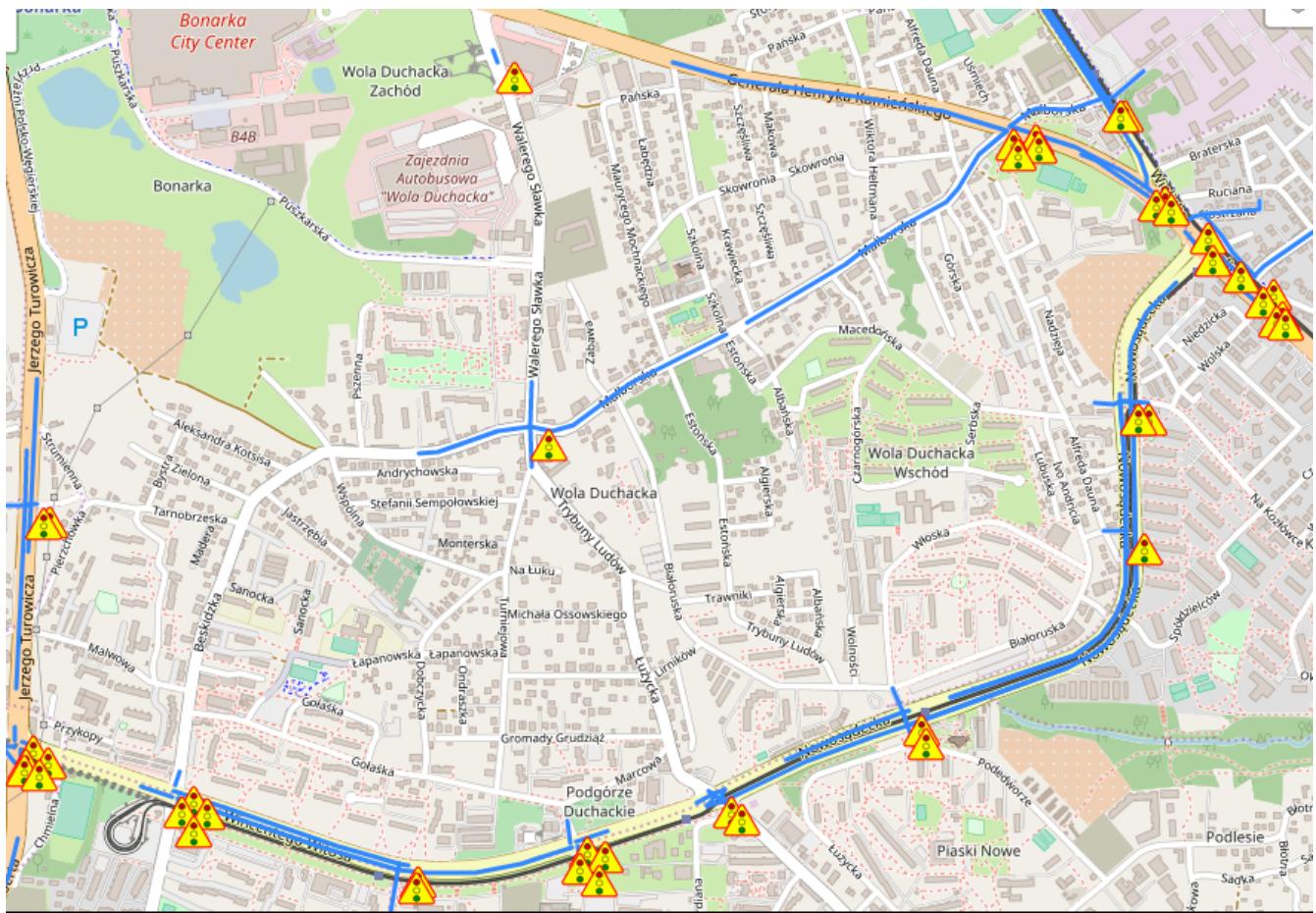


## 4.6. Sygnalizacja świetlna

### 4.6.1. Przyporządkowywanie sygnalizacji świetlnej do poszczególnych dróg

Aby kierowca bez problemu mógł zdążyć zareagować na zmieniające się światła sygnalizacji świetlnej, niezbędnego jest zredukowanie prędkości do odpowiedniej wartości. Ze względu na fakt iż sygnalizacja widoczna jest z relatywnie dużej odległości, prędkość przed sygnalizacją zostanie ograniczona do ok. 50 km/h.

Rys. 4.10. Drogi na których znajduje się sygnalizacja świetlna.



Rys. 4.10 ukazuje sposób działania algorytmu przypisującego do drogi sygnalizację świetlną. Zaznaczono na nim:

- kolorem niebieskim drogi, na których znajduje się sygnalizacja świetlna
- znakiem "A-29" zostały oznaczone sygnalizacje świetlne, pobrane z OpenStreetMap

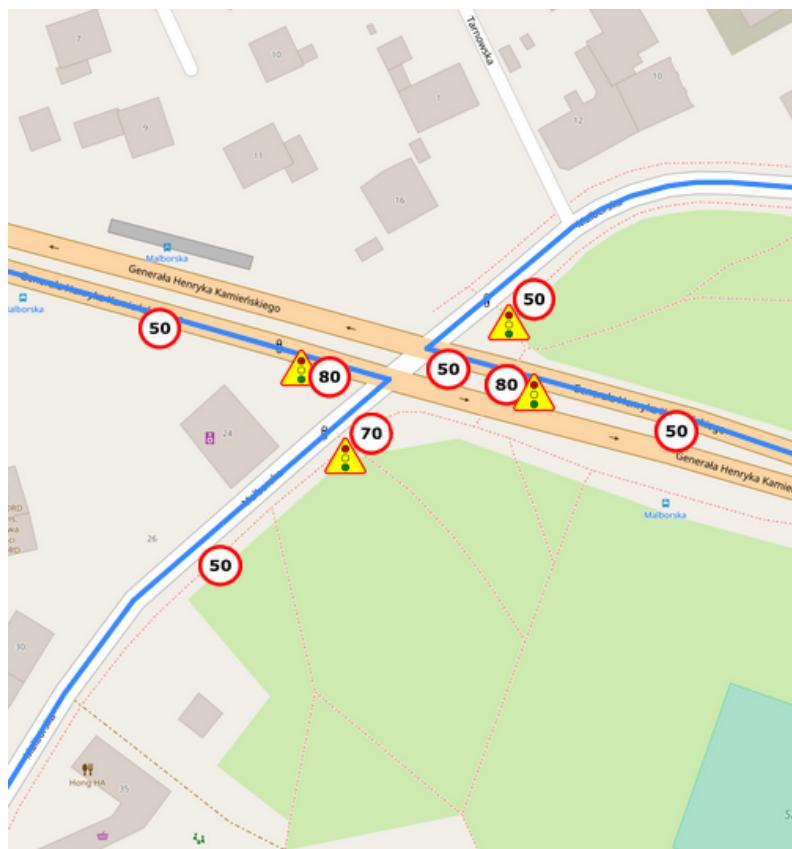
#### 4.6.2. Wyznaczanie prędkości i umieszczanie jej w odpowiednim miejscu na mapie

Algorytm umieszcza znaki ograniczenia prędkości w następujący sposób:

- w przypadku gdy maksymalna prędkość na drodze jest mniejsza bądź równe 50 km/h, nie ma sensu wstawić znaku
- 50m przed sygnalizacją na drodze z ograniczeniem prędkości do 60 km/h
- 150m przed sygnalizacją na drodze z ograniczeniem prędkości powyżej 60 km/h
- w przypadku drogi dwukierunkowej, zarówno przed, jak i za sygnalizacją
- bezpośrednio za sygnalizacją zostanie ustawiony znak przywracająca poprzednie ograniczenie prędkości, za wyjątkiem sytuacji, gdy droga za sygnalizacją świetlną jest krótsza niż 100m. W takim wypadku, nie ma sensu zmieniać prędkości.

Rys. 4.11 obrazuje fragment skrzyżowania na której znajduje się sygnalizacja świetlna. Ograniczenie prędkości na drogach wynosi od 70 do 80 km/h, dlatego algorytm umieścił znak ograniczenia prędkości do 50 km/h, 150m przed sygnalizacją oraz znak przywracający poprzednią prędkość zaraz za sygnalizacją.

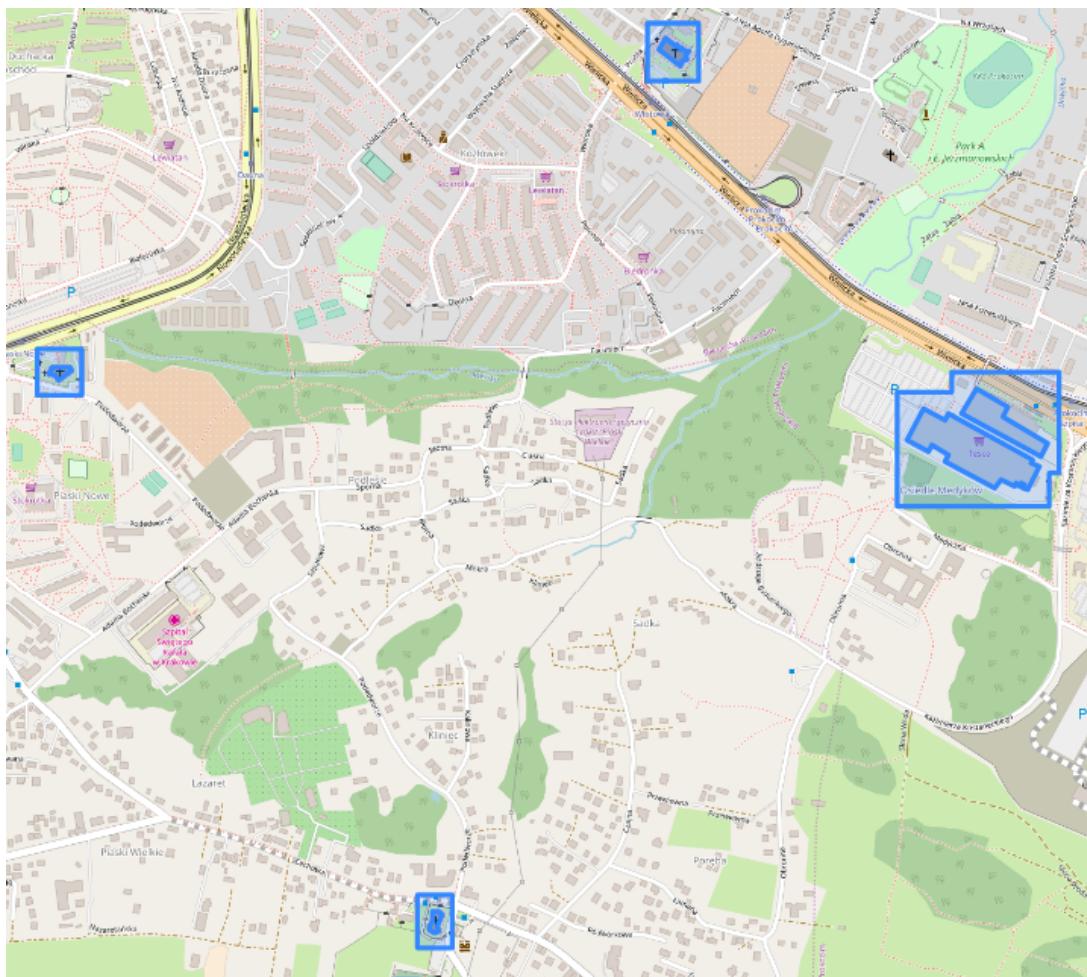
**Rys. 4.11.** Ograniczenie prędkości przed i za światłami drogowymi



## 4.7. Sklepy i miejsca kultów religijnych

Zwiększone ruch samochodów oraz pieszych przy sklepach najczęściejauważalny jest w godzinach wieczornych i w weekendy. Natomiast zwiększenie ruchu w miejscowościach kultu religijnego widoczne jest w czasie świąt. Z tego powodu, algorytm musi uwzględniać takie miejsca. Zostały one przedstawione na rys. 4.12.

Rys. 4.12. Szkoły i miejsca religijne

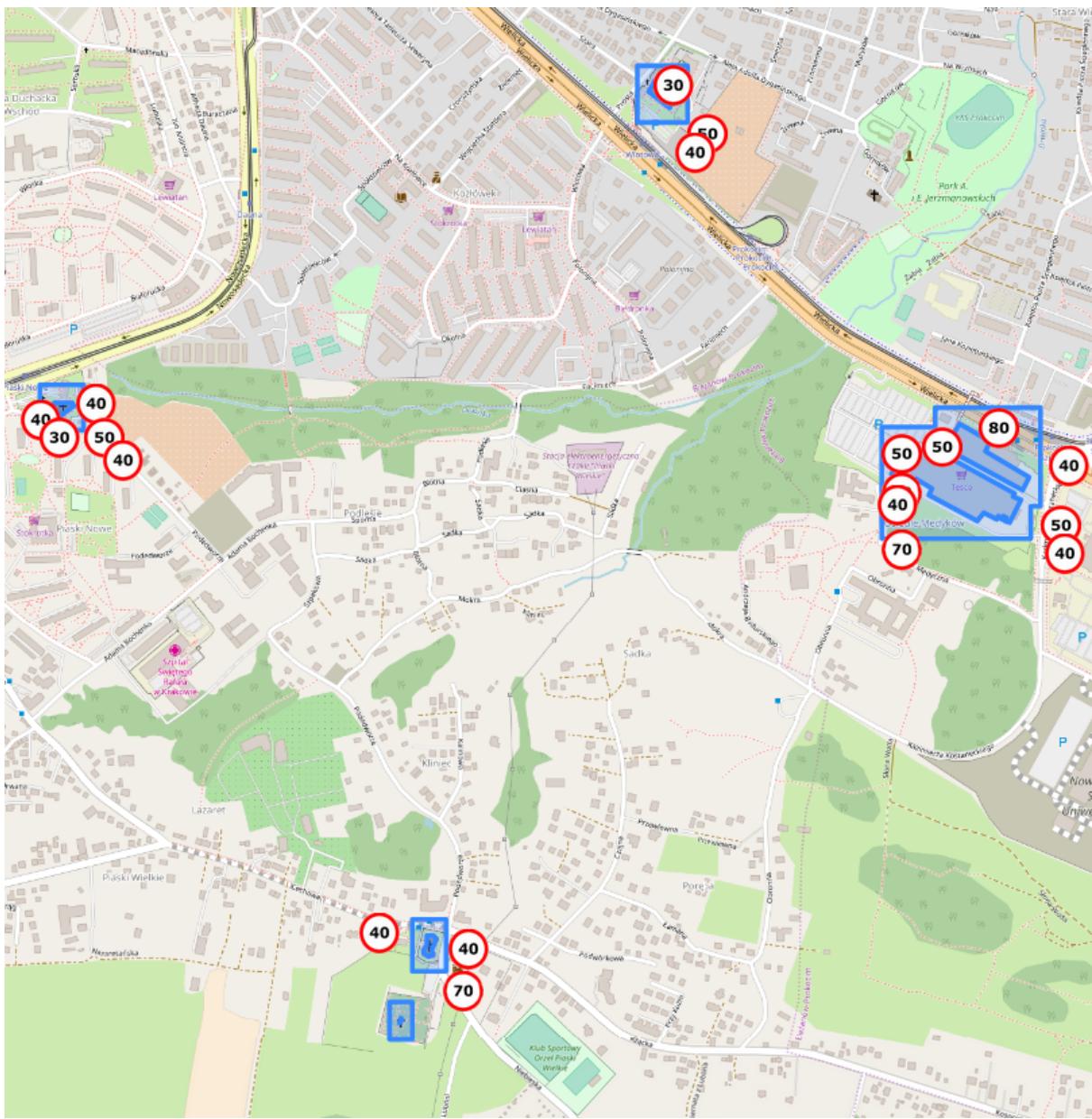


Na rys. 4.12 widoczne są obramowania kościołów i sklepów. Ponadto otoczone są powiększonym obszarem pokrywającym, reprezentującym strefę ograniczenia prędkości.

#### 4.7.1. Wyznaczanie prędkości i umieszczanie jej w odpowiednim miejscu na mapie

Dopuszczalna prędkość z jaką można się poruszać w obrębie sklepów i miejsc kultów wynosi 30 km/h. Znak ograniczenia prędkości ustawiany jest w odległości 50 metrów od początku strefy ograniczonej prędkości, w przypadku gdy dopuszczalna prędkość na drodze nie przekracza 60 km/h. W przeciwnym razie znak ustawiany jest w odległości 150 metrów od początku strefy. Bezpośrednio za końcem strefy ustawiany jest znak przywracający poprzednią prędkość. Sytuacja ta została przedstawiona rys. 4.13.

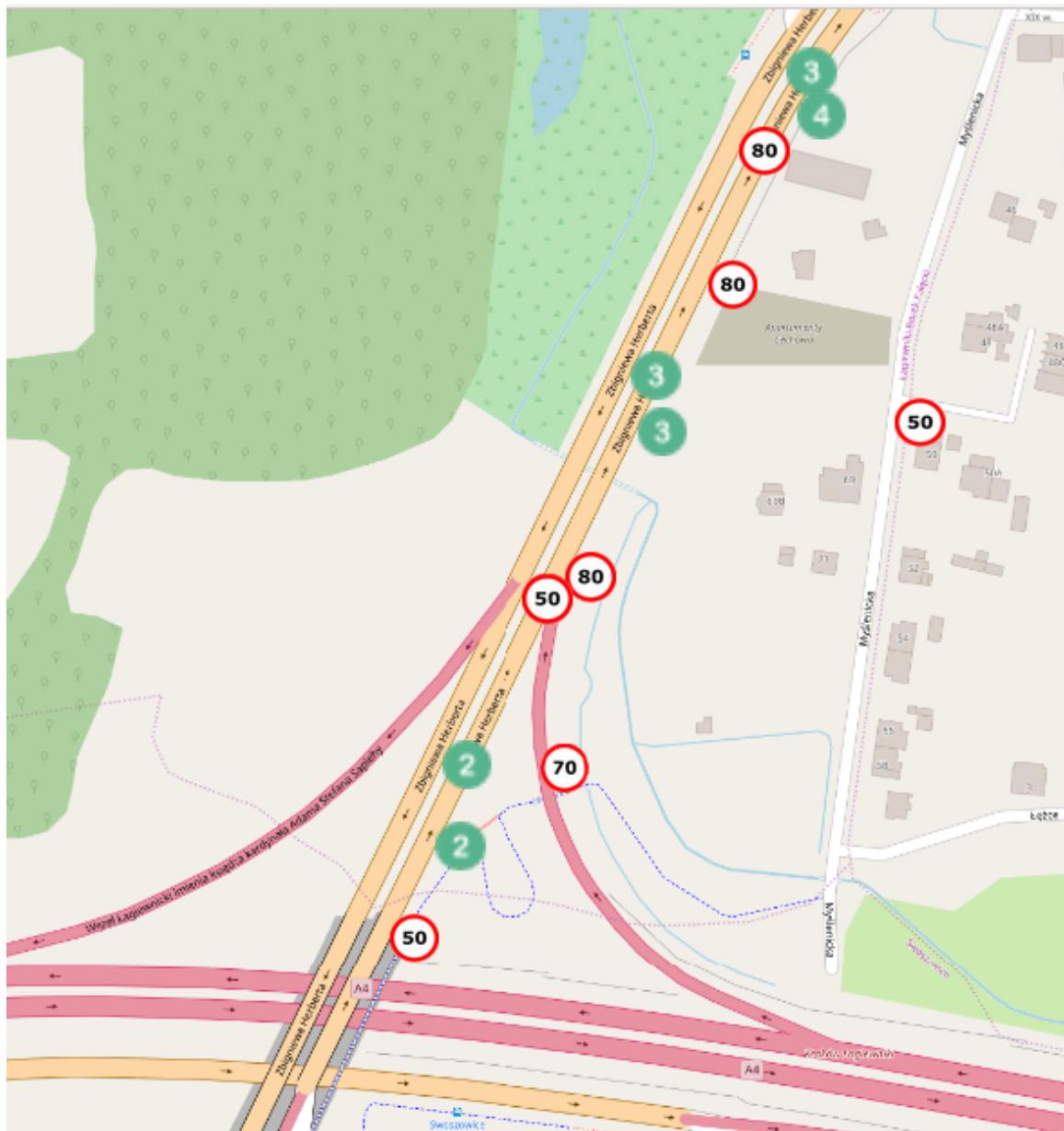
Rys. 4.13. Szkoły i miejsca religijne razem w wyznaczonymi prędkościami



## 4.8. Liczba pasów ruchu

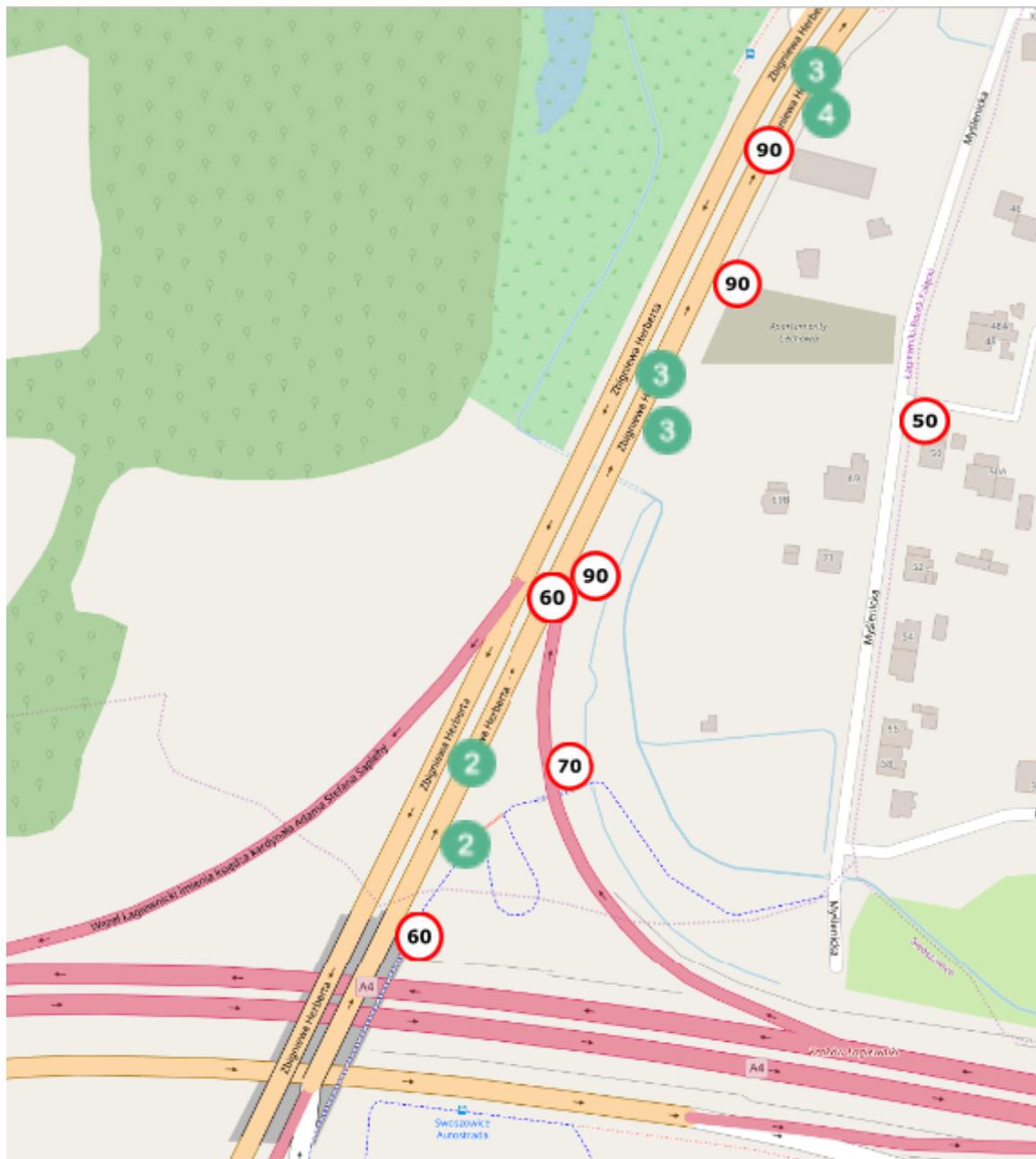
Maksymalna dozwolona prędkość jest zależna również od liczby pasów ruchu. Im jest ich więcej, tym większą prędkość można rozwijać. Dlatego algorytm zwiększa dopuszczalną prędkość o 10 km/h w przypadku gdy liczba pasów ruchu jest większa niż jeden. Na rys 4.14 zostały zaznaczone ulice, których liczba pasów ruchu wynosi przynajmniej 2, oraz prędkości nie uwzględniające pasów ruchu.

Rys. 4.14. Prędkość przy nieuwzględnieniu liczby pasów ruchu



Na rys. 4.15 zostały przedstawione prędkości już z uwzględnioną liczbą pasów ruchu. Zauważać można, że tam, gdzie liczba pasów jest większa niż jeden, prędkość została zwiększone, a tam gdzie występuje tylko jeden pas ruchu, prędkość pozostała niezmieniona. Ograniczenie prędkości dotyczy całego odcinka drogi, dlatego znak ograniczenia prędkości jest umieszczany na początku każdej drogi.

Rys. 4.15. Prędkość uwzględniająca liczbę pasów ruchu



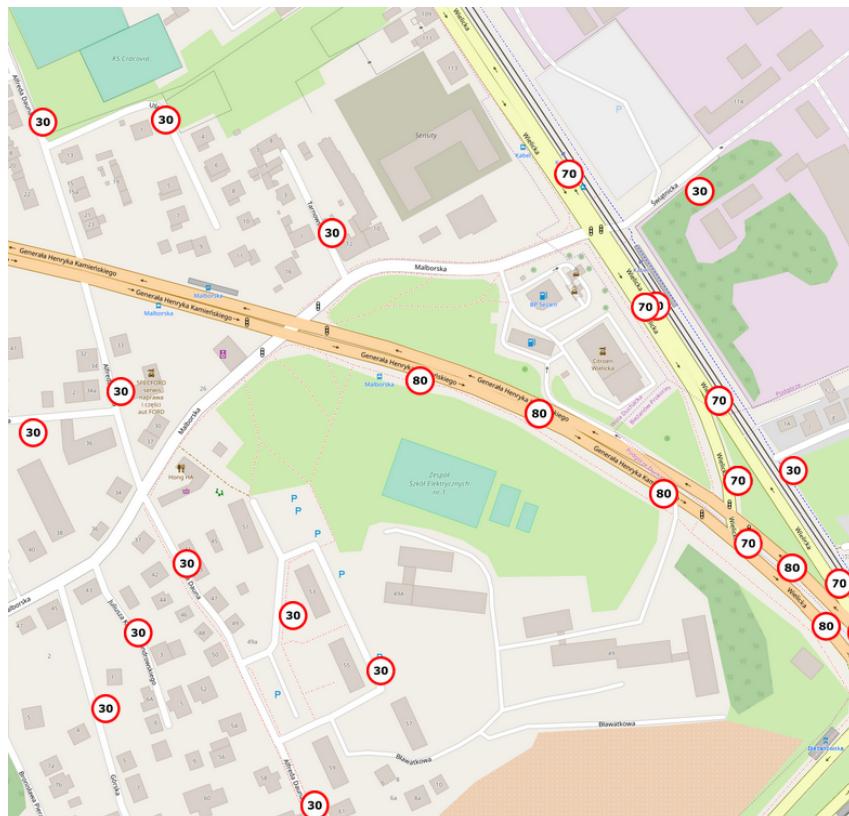
## 4.9. Rodzaj drogi

Algorytm rozróżnia sześć podstawowych typów dróg, w skład których wchodzą:

- dojazdowe
- lokalne
- główne
- główne przyspieszonego ruchu
- ekspresowe
- autostrady

Dla dróg dojazdowych i lokalnych ograniczenie prędkość wyznaczone przez algorytm wynosi 30 km/h. Dla dróg głównych ograniczenie prędkości wynosi 70 km/h, dla dróg głównych przyspieszonego ruchu 80 km/h, natomiast dla dróg ekspresowych 120 km/h oraz dla autostrad 140 km/h. Ograniczenia prędkości ze względu na typ drogi zostały przedstawione na rys 4.16

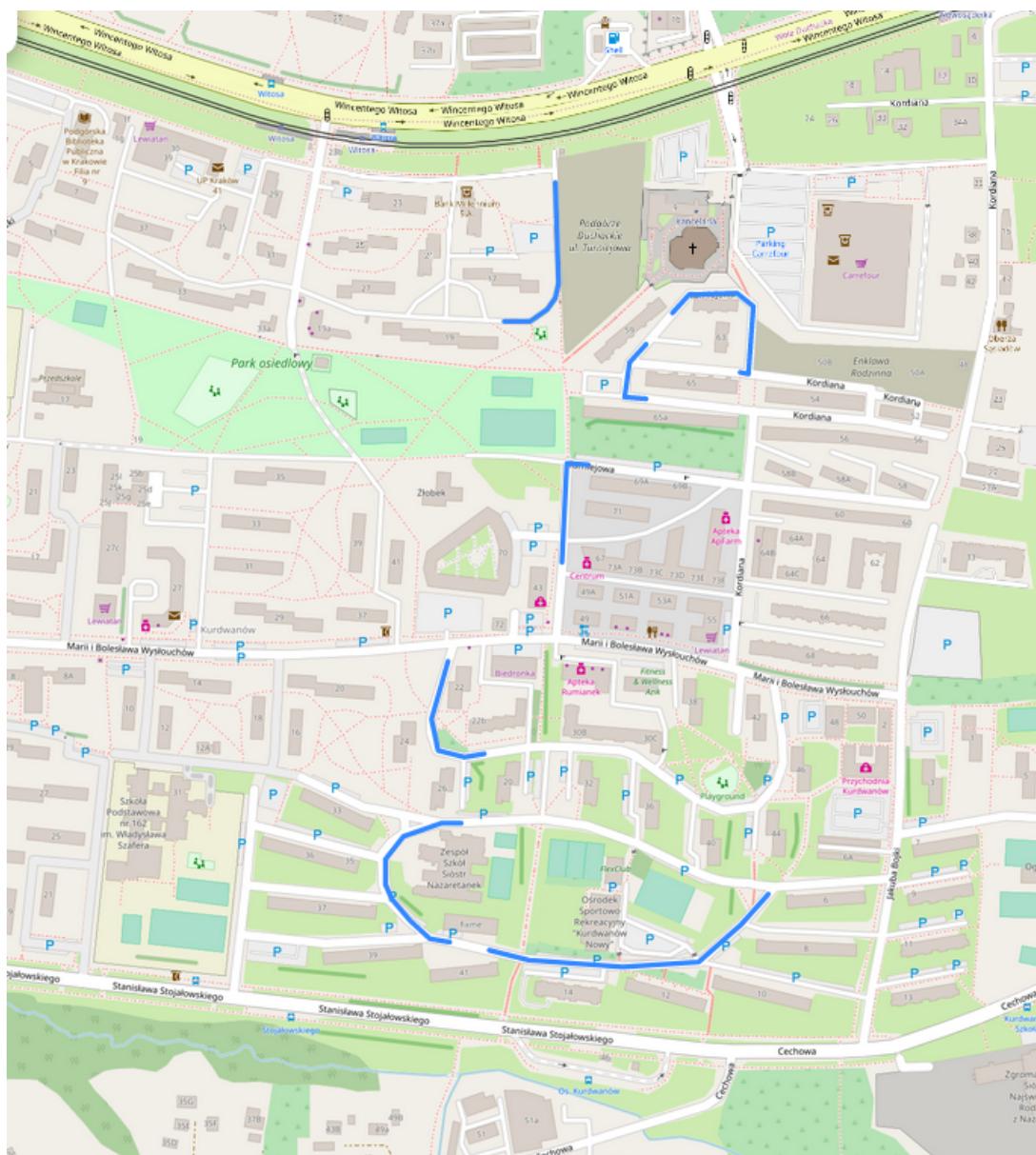
Rys. 4.16. Ograniczenie prędkości w zależności od rodzajów dróg



## 4.10. Zakręty

Ostatnim czynnikiem wpływającym na prędkość wyznaczoną przez algorytm są zakręty. Każdy zakręt posiada wyliczony swój promień skrętu. Dokładny opis ich wyznaczenia został przedstawiony w sekcji 3.11 Na rys. 4.17 zostały zakręty, dla których promień skrętu jest większy niż 50m

Rys. 4.17. Zaznaczone zakręty



#### 4.10.1. Wyznaczanie prędkości i umieszczanie jej w odpowiednim miejscu na mapie

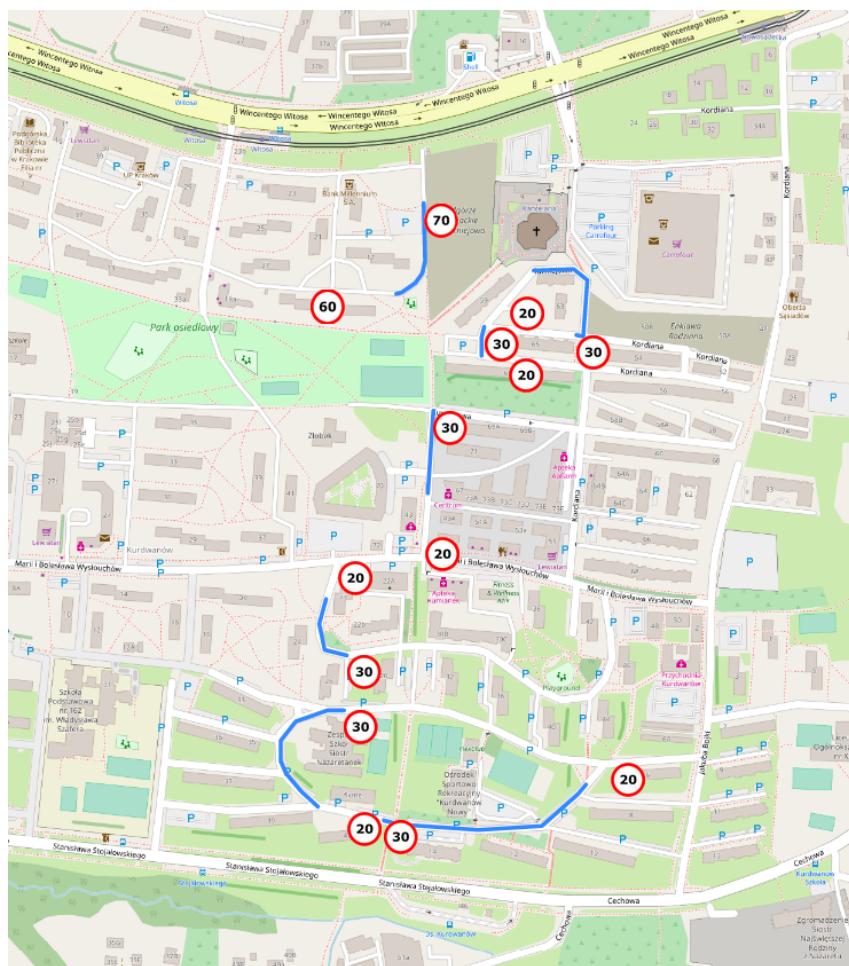
Algorytm uwzględnia trzy rodzaje promieni skrętów:

- mały promień skrętu o długości promienia nie przekraczającej 300 metrów
- średni promień skrętu o długości promienia między 300 a 600 metrów
- duży promień skrętu o długości promienia powyżej 600 metrów.

Ograniczenie prędkości w przypadku małego promienia skrętu jest zmniejszane o 10 km/h, w przypadku średniego promienia skrętu, dopuszczalna prędkość zmniejsza się o 20 km/h, natomiast przy dużym promieniu skrętu, prędkość zredukowana jest o 30 km/h.

Znak ustawiany jest 50 metrów od początku skrętu, w przypadku gdy dopuszczalna prędkość nie przekracza 60 km/h. W przeciwnym wypadku, znak umieszczany jest 150 metrów od początku skrętu. Bezpośrednio na końcu zakrętu, umieszczany jest znak przywracający poprzednią prędkość. Sytuację tą obrazuje rys 4.18

Rys. 4.18. Zaznaczone zakręty razem z wyliczonymi prędkościami



## 4.11. Działanie algorytmu

Na początku wyliczane jest domyślne ograniczenie prędkości dla każdej drogi na podstawie poniższych kryteriów:

- Typ nawierzchni - szczegółowo w rozdziale 4.1
- Rodzaj drogi - szczegółowo w rozdziale 4.16
- Długość drogi
- Liczby pasów ruchu - szczegółowo w rozdziale 4.14

Następnie algorytm przystępuje do umieszczania znaków na drodze według następującej kolejności:

- jeśli droga jest krótsza niż 50m, nie ustawia znaku
- jeśli domyślna prędkość jest mniejsza bądź równa ograniczeniu prędkości wymaganym przez obiekt typu przejście dla pieszych, szkoła, zakręt itp, nie ustawia znaku
- jeśli droga lub jej fragment znajdują się w strefie ograniczonej prędkości, to wewnątrz tej strefy nie są ustawiane żadne inne ograniczenia prędkości.
- na początku drogi ustawia znak domyślnego ograniczenia prędkości, chyba że zachodzą następujące czynniki:
  - gdy domyślna prędkość jest mniejsza bądź równa 60 km/h i obiekt typu przejście dla pieszych, szkoła, zakręt itp znajduje się w odległości mniejszej bądź równej 50m
  - gdy domyślna prędkość przekracza 60 km/h i obiekt znajduje się w odległości mniejszej bądź równej 150m

w takim przypadku na początku drogi ustawiane jest ograniczenie prędkości dla danego obiektu.

- w odległości 50 metrów od obiektów jednowymiarowych typu przejście dla pieszych itp, lub 50 metrów przed początkiem strefy ograniczonej prędkości, gdy dopuszczalna prędkość jest mniejsza bądź równa 60 km/h. Dotyczy sytuacji, gdy w odległości nie większej niż 50 metrów przed obiektem, nie znajduje się inny obiekt. W przeciwnym razie, ograniczenie prędkości nie jest ustawiane.
- w odległości 150 metrów od obiektów jednowymiarowych typu przejście dla pieszych itp, lub 150 metrów przed początkiem strefy ograniczonej prędkości, gdy dopuszczalna prędkość przekracza 60 km/h. Dotyczy sytuacji, gdy w odległości nie większej niż 150 metrów przed obiektem, nie znajduje się inny obiekt. W przeciwnym razie, ograniczenie prędkości nie jest ustawiane.
- jeśli za obiektem typu przejście dla pieszych lub za strefą ograniczonej prędkości znajduje się inny obiekt ustawiony w odległości:

- 50 metrów, w przypadku domyślnej prędkości na drodze nie przekraczającej 60 km/h
- 150 metrów, w przypadku domyślnej prędkości większej niż 60 km/h

to bezpośrednio za tym obiektem ustawia znak ograniczenia prędkości wymagany przez następny obiekt. Chyba że ograniczenie prędkości dopuszczalne dla następnego obiektu jest mniejsze bądź równe aktualnemu. W takim przypadku nie ustawia znaku

- bezpośrednio za obiektem przywracana jest domyślna prędkość na drodze, chyba że
  - długość drogi za obiektem jest mniejsza niż 50 metrów
  - domyślne ograniczenie prędkości jest mniejsze bądź równe ograniczeniu wymaganemu przed dany obiekt

W takich przypadkach nie przywraca domyślnej prędkości.

- Jeśli koło siebie znajdują się znaki prędkości z takim samym ograniczeniem - algorytm zostawia pierwszy, kolejne usuwa



## 5. Interfejs użytkownika

Niniejszy rozdział skupia się na szczegółowym opisie interfejsu użytkownika. Zostały przedstawione najważniejsze funkcje, które pomogą użytkownikom w korzystaniu z programu. Omówiono poszczególne warstwy wyświetlane na mapie, przełączanie między nimi oraz dodawanie nowych obiektów punktowych jak również dwuwymiarowych. W pierwszej sekcji został przedstawiony widok główny aplikacji wraz z dokładnym omówieniem. W dalszej części tego rozdziału, zostały opisane kolejne warstwy. Na końcu przedstawiony został sposób, na dodawanie własnych obiektów.

### 5.1. Widok główny aplikacji

Rys. 5.1. przedstawia widok główny aplikacji. W lewym górnym rogu znajdują się dwa przyciski: "+" oraz "-". Umożliwiają one przybliżanie i oddalanie widoku mapy. W prawym górnym rogu znajduje się menu wyboru wyświetlanej warstwy. Szczegóły dostępne w rozdziale 5.2. Ponadto, użytkownik posiada możliwość, za pomocą myszki, przesuwania obecnie wyświetlanej mapy w dowolnym kierunku. Mapa pobierana jest w czasie rzeczywistym ze strony OpenStreetMap. Na dole znajdują się dwa nieaktywne pola typu input, służące do wyświetlania współrzędnych, jedna lista wyboru, przycisk do dodawania kolejnych współrzędnych oraz przycisk do dodawania obiektu. Lista wyboru umożliwia wybranie jednej z sześciu kategorii:

- **traffic signal** - sygnalizacji świetlnej
- **pedestrian crossing** - przejście dla pieszych
- **rail crossing** - przejazd kolejowy
- **bus stop** - przystanek autobusowy lub tramwajowy
- **schools** - szkoły
- **shops churches** - sklep lub miejsce kultu religijnego

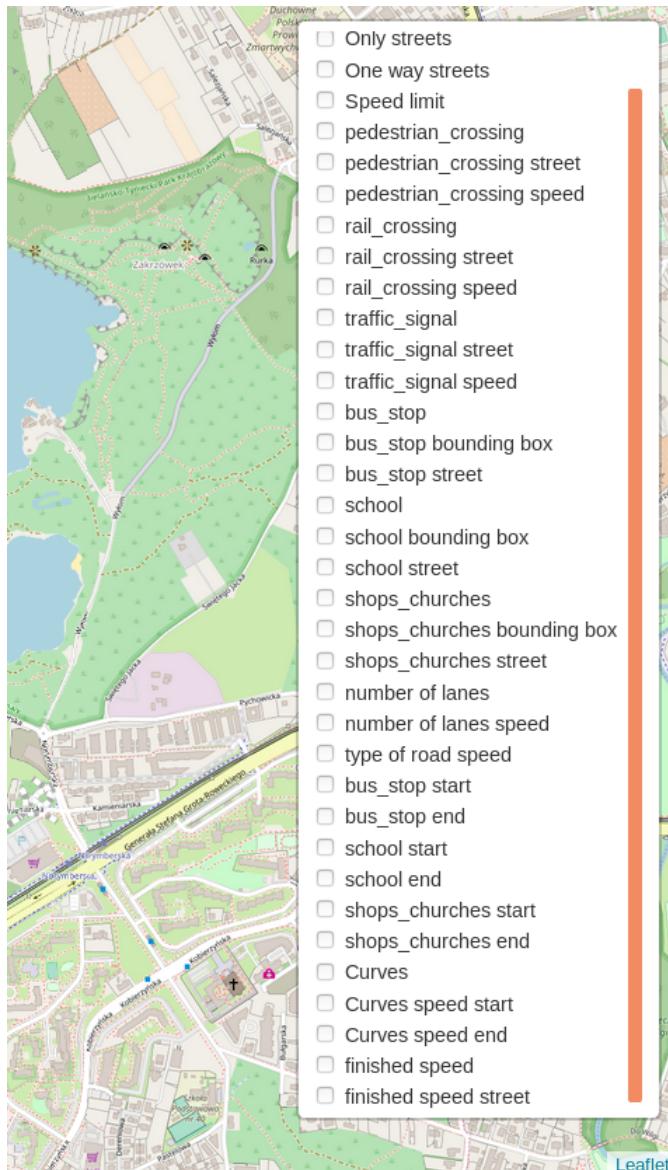
Rys. 5.1. Widok główny aplikacji



## 5.2. Menu wyboru warstw

Rys. 5.2. przedstawia menu wyboru warstw. Dostępny jest dopiero po najechaniu kursorem myszy w prawy górny róg. Umożliwia wyświetlanie na mapie elementów, które użytkownik w danej chwili potrzebuje.

Rys. 5.2. Menu wyboru warstw



Menu wyboru warstw, Rys. 5.2, składa się z 35 elementów:

- **Only street** - służy do zaznaczania na mapie, wszystkich dostępnych ulic. Więcej szczegółów znajduje się w rozdziale 5.3
- **One way streets** - zaznacza na mapie drogi jednokierunkowe

- **pedestrian crossing, pedestrian crossing street i pedestrian crossing speed** - zaznacza na mapie odpowiednio przejścia dla pieszych, ulice na których się one znajdują oraz ograniczenia prędkości. Szczegóły zostały opisane w rozdziale 4.2
- **rail crossing, rail crossing street i rail crossing speed** - zaznacza na mapie odpowiednio przejazdy kolejowe, ulice na których się one znajdują oraz ograniczenia prędkości. Szczegóły zostały opisane w rozdziale 4.4
- **traffic signal, traffic signal street i traffic signal speed** - zaznacza na mapie odpowiednio sygnalizację świetlną, ulice na których się one znajdują oraz ograniczenia prędkości. Szczegóły zostały opisane w rozdziale 4.6
- **bus stop, bus stop bounding box, bus stop street, bus stop start oraz bus stop end** - zaznacza na mapie odpowiednio przystanki autobusowe i tramwajowe, minimalny obszar pokrywający te przystanki powiększony o 5 metrów, ulice na których znajdują się przystanki, znaki początku oraz końca ograniczenia prędkości. Szczegóły opisane zostały w rozdziale 4.3
- **school, school bounding box, school street, school start oraz school end** - zaznacza na mapie odpowiednio szkoły, minimalny obszar pokrywający szkoły powiększony o 30 metrów, ulice przy których znajdują się szkoły, znaki początku oraz końca ograniczenia prędkości. Szczegóły opisane zostały w rozdziale 4.5
- **shops churches, shops churches bounding box, shops churches street, shops churches start oraz shops churches end** - zaznacza na mapie odpowiednio sklepy i miejsca kultów religijnych, minimalny obszar pokrywający te obiekty powiększony o 30 metrów, ulice przy których znajdują się te obiekty, znaki początku oraz końca ograniczenia prędkości. Szczegóły opisane zostały w rozdziale 4.7
- **number of lanes, number of lanes speed** - zaznacza na mapie odpowiednio liczbę pasów ruchu oraz prędkość z nimi związaną. Szczegóły zostały opisane w rozdziale 4.14
- **type of road speed** - zaznacza na mapie ograniczenia prędkości związane z typem nawierzchni. Szczegóły zostały opisane w rozdziale 4.16
- **Curves, Curves speed start, Curves speed end** - zaznacza na mapie odpowiednio zakręty, znaki początku i końca ograniczenia prędkości dotyczące zakrętów. Szczegóły zostały opisane w rozdziale 4.10
- **finished speed, finished speed street** - Najważniejsza warstwa. Umieszcza ograniczenia prędkości na mapie, wyznaczone na podstawie wszystkich powyższych składowych. Szczegóły zostały opisane w rozdziale 4.11

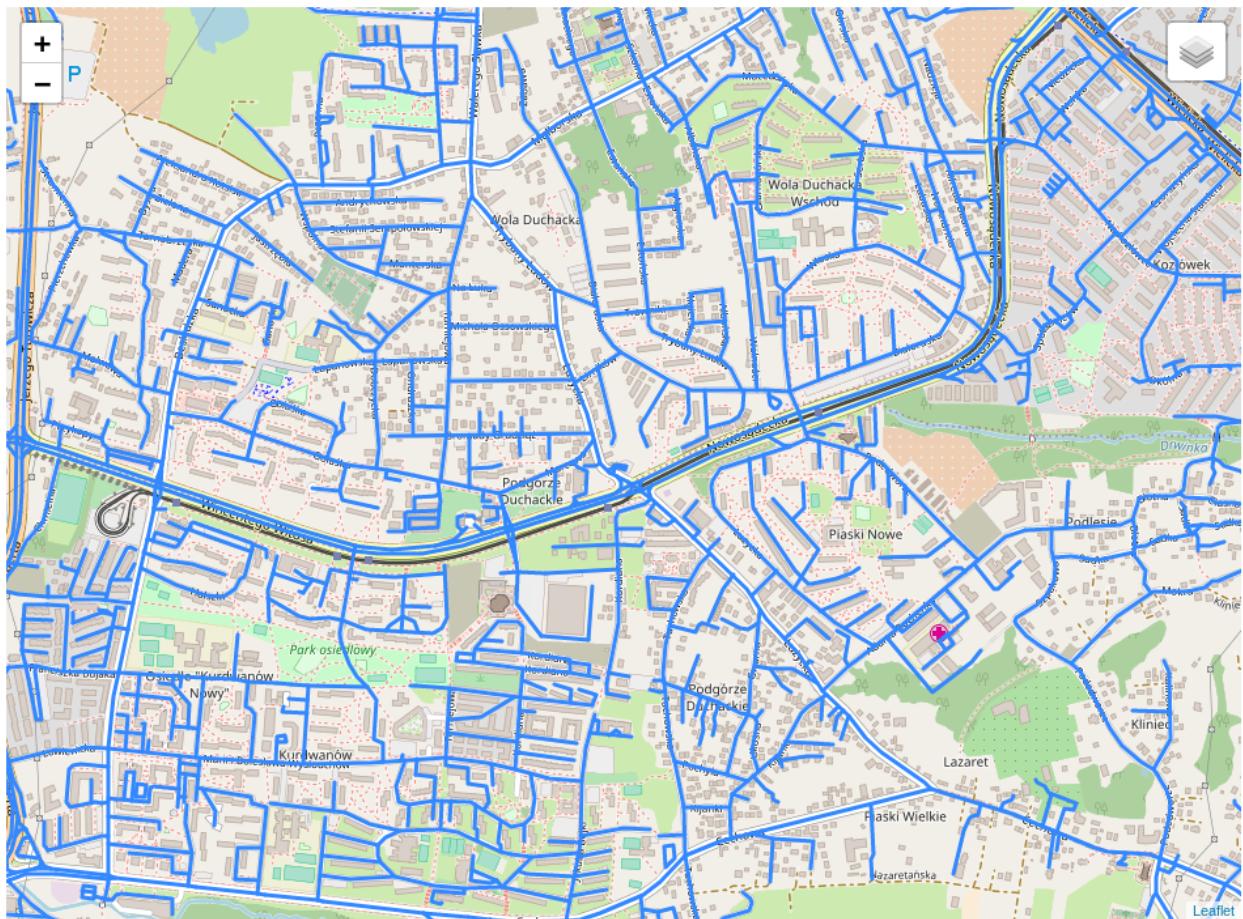
Istotną funkcjonalnością jest możliwość wyświetlania dowolnych kombinacji warstw. Użytkownik może zaznaczyć dowolną liczbę widoków, które zostaną wyświetlane na głównej mapie.

### 5.3. Widok zaznaczonych ulic

Rys. 5.3 przedstawia mapę, na której zaznaczone są poszczególne odcinki dróg. Reprezentowane są przez niebieskie linie łamane, przebiegającą przez sam jej środek. Zostały uwzględnione różnego rodzaju klasy dróg, takie jak:

- autostrady
- drogi ekspresowe
- drogi główne ruchu przyspieszonego
- drogi główne
- drogi zbiorcze
- drogi lokalne
- drogi dojazdowe

Rys. 5.3. Widok zaznaczonych ulic



## 5.4. Dodawanie własnych obiektów

Jednym z kluczowych elementów działania aplikacji jest dodawanie własnych obiektów. Użytkownik ma możliwość dodać zarówno obiekty dwuwymiarowe jak i reprezentowane przez pojedynczy punkt.

Rys. 5.4 przedstawia widok dodawania nowego obiektu

Rys. 5.4. Widok dodawania obiektów



### 5.4.1. Dodawanie obiektów reprezentowanych przez pojedynczy punkt

Do obiektów reprezentowanych przez pojedynczy punkt zaliczyć można:

- Przejścia dla pieszych
- Sygnalizacje świetlne
- Przejazdy kolejowe

Algorytm dodawania obiektów wygląda następująco:

1. Kliknąć na mapie w dowolnie wybrany punkt - pojawi się dymek z widocznymi współrzędnymi, oraz zostaną wypełnione dwa pola pod mapą - widoczne na rysunku: 5.4
2. Wybrać z listy rozwijanej jeden z trzech typów: przejście dla pieszych, sygnalizację świetlną lub przejazd kolejowy
3. Nacisnąć przycisk: Add object - obiekt został dodany do mapy.

### 5.4.2. Dodawanie obiektów reprezentowanych przez zbiór punktów

Do obiektów reprezentowanych przez zbiór punktów zaliczyć można:

- Przystanki autobusowe i tramwajowe
- Szkoły
- Place zabaw
- Sklepy
- Obiekty kultów religijnych

Algorytm dodawania obiektów wygląda następująco:

1. Kliknąć na mapie w dowolnie wybrany punkt będącym jednym z rogów nowo dodawanego obiektu dwuwymiarowego - pojawi się dymek z widocznymi współrzędnymi, oraz zostaną wypełnione dwa pola pod mapą - widoczne na rysunku: 5.4
2. Nacisnąć przycisk: Add coordinates - współrzędne wybranego punktu zostały zapisane w pamięci
3. Powtarzać krok 1 i 2, do momentu aż cały obiekt nie zostanie oznaczony
4. Wybrać z listy rozwijanej jeden z trzech typów: przystanek autobusowy lub tramwajowy, szkoła, plac zabaw, sklep lub obiekt kultu religijnego
5. Nacisnąć przycisk: Add object - obiekt został dodany do mapy.



## **6. Wnioski**

Głównym celem niniejszej pracy dyplomowej było stworzenie inteligentnego systemu predykcji dopuszczalnych prędkości w ruchu drogowym. Taki system powstał, a jego skuteczność jest na bardzo wysokim poziomie. Uwzględnia wiele czynników, takich jak obecność przejść dla pieszych, sygnalizacji świetlnej, przejazdów kolejowych. Bierze pod uwagę pobliże szkół, placów zabaw, przystanków tramwajowych i autobusowych, sklepów i miejsc kultów religijnych oraz promień skrętu dla poszczególnych dróg. Dzięki takiemu podejściu, możliwym było stworzenie optymalnego rozwiązania, w którym podstawowym kryterium było bezpieczeństwo uczestników w ruchu drogowym, przy zachowaniu maksymalnej przepustowości infrastruktury drogowej.



## Bibliografia

- [1] M. Levasseur i B. Mitchell. *Expanded Operating Speed Model*. Spraw. tech. AP-T229-13. Austro-ads Ltd, 2013.
- [2] C. Han i in. *Best Practice for Variable Speed Limits: Literature Review*. Spraw. tech. AP-R342/09. Austroads Incorporated, 2009.
- [3] C. Han, V. Pyta i J. Luk. *Best Practice for Variable Speed Limits: Best Practice Recommendations*. Spraw. tech. AP-R344/09. Austroads Incorporated, 2009.
- [4] C. Jurewicz i in. *Model National Guidelines for Setting Speed Limits at High-risk Locations*. Spraw. tech. AP-R455-14. Austroads Ltd, 2014.
- [5] G. Forbes i in. *Methods and Practices for Setting Speed Limits: An Informational Report*. Spraw. tech. FHWA-SA-12-004. Institute of Transportation Engineers, 2012.
- [6] Annika K. Jägerbrand i Jonas Sjöbergh. „Effects of weather conditions, light conditions, and road lighting on vehicle speed”. W: *SpringerPlus* 5.1 (kw. 2016), s. 505. ISSN: 2193-1801. DOI: [10.1186/s40064-016-2124-6](https://doi.org/10.1186/s40064-016-2124-6).
- [7] Suresh Nama i in. „Vehicle Speed Characteristics and Alignment Design Consistency for Mountainous Roads”. W: *Transportation in Developing Economies* 2.2 (wrz. 2016), s. 23. ISSN: 2199-9295. DOI: [10.1007/s40890-016-0028-3](https://doi.org/10.1007/s40890-016-0028-3).
- [8] Rachid Marzoug i in. „Car Accidents at the Intersection with Speed Limit Zone and Open Boundary Conditions”. W: *Cellular Automata*. Wyed. Samira El Yacoubi, Jaroslaw Wąs i Stefania Bandini. Cham: Springer International Publishing, 2016, s. 303–311. ISBN: 978-3-319-44365-2.
- [9] Harri Peltola i Juha Luoma. „Comparison of road safety in Finland and Sweden”. W: *European Transport Research Review* 9.1 (grud. 2016), s. 3. ISSN: 1866-8887. DOI: [10.1007/s12544-016-0220-x](https://doi.org/10.1007/s12544-016-0220-x).
- [10] Gundolf Jakob. „Impact of Different Lengths of Urban Road Segments on Speed-Volume Relationship”. W: *Contemporary Challenges of Transport Systems and Traffic Engineering*. Wyed. Elżbieta Macioszek i Grzegorz Sierpiński. Cham: Springer International Publishing, 2017, s. 169–180. ISBN: 978-3-319-43985-3.

- [11] Constantin Alexandru Bratu i Dinu Covaciu. „Study on the Influence of Intersections with Forest Roads upon the Traffic Flows on Highways”. W: *CONAT 2016 International Congress of Automotive and Transport Engineering*. Wyd. Anghel Chiru i Nicolae Ispas. Cham: Springer International Publishing, 2017, s. 710–720. ISBN: 978-3-319-45447-4.
- [12] Xiaohua Zhao i in. „Evaluation of the effects of school zone signs and markings on speed reduction: a driving simulator study”. W: *SpringerPlus 5.1* (czer. 2016), s. 789. DOI: [10.1186/s40064-016-2396-x](https://doi.org/10.1186/s40064-016-2396-x).
- [13] Pritam Saha i in. „Speed Distribution on Two-Lane Rural Highways with Mixed Traffic: A Case Study in North East India”. W: *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A* 98.1 (czer. 2017), s. 107–113. ISSN: 2250-2157. DOI: [10.1007/s40030-017-0208-0](https://doi.org/10.1007/s40030-017-0208-0).
- [14] Mansour Hadji Hosseinlou, Salman Aghidi Kheyrabadi i Abbas Zolfaghari. „Determining optimal speed limits in traffic networks”. W: *IATSS Research* 39.1 (2015), s. 36 –41. ISSN: 0386-1112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2014.08.003>.
- [15] Rune Elvik. „Speed Limits, Enforcement, and Health Consequences”. W: *Annual Review of Public Health* 33.1 (2012), s. 225–238. DOI: [10.1146/annurev-publhealth-031811-124634](https://doi.org/10.1146/annurev-publhealth-031811-124634).
- [16] Akhilesh Kumar Maurya i in. „Study on Speed and Time-headway Distributions on Two-lane Bidirectional Road in Heterogeneous Traffic Condition”. W: *Transportation Research Procedia* 17 (2016). International Conference on Transportation Planning and Implementation Methodologies for Developing Countries (12th TPMDC) Selected Proceedings, IIT Bombay, Mumbai, India, 10–12 December 2014, s. 428 –437. ISSN: 2352-1465. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.11.084>.
- [17] Ashish Dhamaniya i Satish Chandra. „Speed Prediction Models for Urban Arterials Under Mixed Traffic Conditions”. W: *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 104 (2013). 2nd Conference of Transportation Research Group of India (2nd CTRG), s. 342 –351. ISSN: 1877-0428. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.11.127>.
- [18] Anna Vadeby i Åsa Forsman. „Traffic safety effects of new speed limits in Sweden”. W: *Accident Analysis and Prevention* 114 (2018). Road Safety on Five Continents 2016 - Conference in Rio de Janeiro, Brazil., s. 34 –39. ISSN: 0001-4575. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.02.003>.
- [19] Stanislaw Gaca i Mariusz Kiec. „Speed Management for Local and Regional Rural Roads”. W: *Transportation Research Procedia* 14 (2016). Transport Research Arena TRA2016, s. 4170 –4179. ISSN: 2352-1465. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.388>.
- [20] Oscar Oviedo-Trespalacios i in. „Effects of road infrastructure and traffic complexity in speed adaptation behaviour of distracted drivers”. W: *Accident Analysis and Prevention* 101 (2017), s. 67 –77. ISSN: 0001-4575. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.01.018>.

- [21] Anne Goralzik i Mark Vollrath. „The effects of road, driver, and passenger presence on drivers' choice of speed: a driving simulator study”. W: *Transportation Research Procedia* 25 (2017). World Conference on Transport Research - WCTR 2016 Shanghai. 10-15 July 2016, s. 2061 – 2075. ISSN: 2352-1465. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.400>.
- [22] Francesc Soriguera i in. „Effects of low speed limits on freeway traffic flow”. W: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 77 (2017), s. 257 –274. ISSN: 0968-090X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.01.024>.
- [23] Arthur van Bentham. „What is the optimal speed limit on freeways?” W: *Journal of Public Economics* 124 (2015), s. 44 –62. ISSN: 0047-2727. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpubeco.2015.02.001>.