Aleet

REFERAT NAUKOWY / WYNIKI PRAC B+R

Metodyka krótkoterminowej predykcji warunków ruchowych

dla algorytmów dynamicznego trasowania pojazdów w inteligentnych systemach transportowych

Od danych GPS i modeli ML do decyzji algorytmu VRP

Katarzyna Marczuk | Aleet

Projekt Livable Cities • badania 2021–2023 • 27 października 2026

Od badań nad mobilnością do decyzji operacyjnych

Dlaczego prognozowanie ruchu jest ważnym problemem badawczym dla Aleet?

PRELEGENTKA

Katarzyna Marczuk

Założycielka i CEO Aleet

- Badania nad systemami mobility-on-demand
- Doktorat, National University of Singapore we współpracy z MIT (2016)
- Prowadzenie projektu B+R Livable Cities

Kontekst: badania Aleet / Livable Cities; K. Marczuk, rozprawa doktorska, NUS (2016).

Od badań nad mobilnością do decyzji operacyjnych

Dlaczego prognozowanie ruchu jest ważnym problemem badawczym dla Aleet?

PRELEGENTKA

Katarzyna Marczuk

Założycielka i CEO Aleet

- Badania nad systemami mobility-on-demand
- Doktorat, National University of Singapore we współpracy z MIT (2016)
- Prowadzenie projektu B+R Livable Cities

O ALEET

Decision Intelligence dla logistyki

Łączymy prognozowanie, modele operacyjne i optymalizację, aby wspierać decyzje o trasach i przydziałach.

PROGNOZA
ruch i popyt

→

CZAS DOJAZDU
ETA / macierz

→

DECYZJA
trasa / przydział

Kontekst: badania Aleet / Livable Cities; K. Marczuk, rozprawa doktorska, NUS (2016).

Od badań nad mobilnością do decyzji operacyjnych

Dlaczego prognozowanie ruchu jest ważnym problemem badawczym dla Aleet?

PRELEGENTKA

Katarzyna Marczuk

Założycielka i CEO Aleet

- Badania nad systemami mobility-on-demand
- Doktorat, National University of Singapore we współpracy z MIT (2016)
- Prowadzenie projektu B+R Livable Cities

O ALEET

Decision Intelligence dla logistyki

Łączymy prognozowanie, modele operacyjne i optymalizację, aby wspierać decyzje o trasach i przydziałach.

PROGNOZA ruch i popyt → **CZAS DOJAZDU** ETA / macierz → **DECYZJA** trasa / przydział

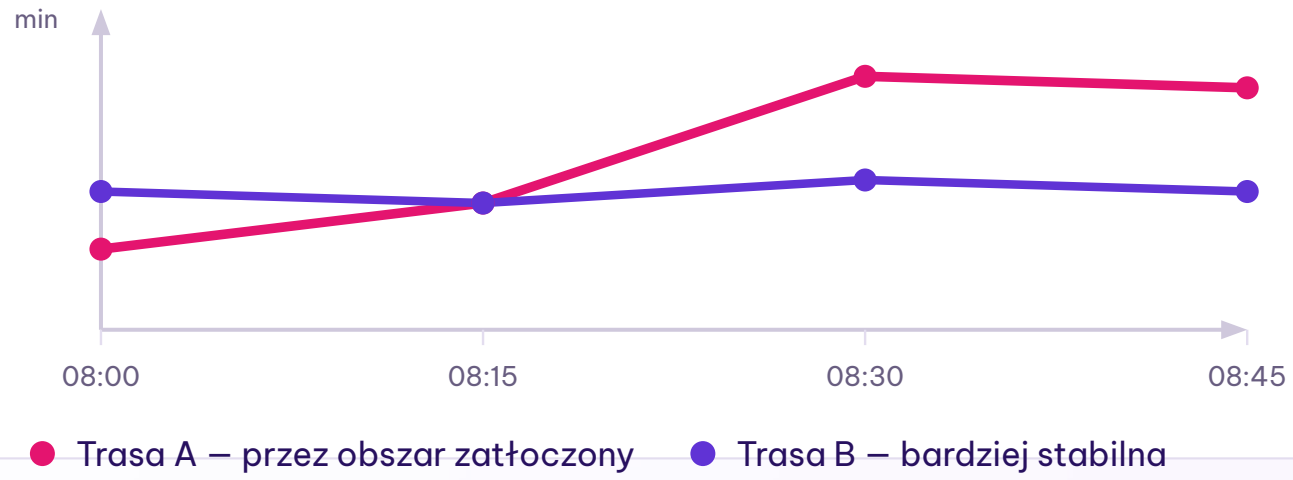
DLACZEGO TO BADAMY? **Błąd czasu przejazdu może zmienić trasę i przydział pojazdu — nie tylko ETA.**

Kontekst: badania Aleet / Livable Cities; K. Marczuk, rozprawa doktorska, NUS (2016).

Trasa najlepsza teraz może nie być najlepsza za 30 minut

Warunki ruchu zmieniają się pomiędzy wyznaczeniem planu a realizacją przejazdu.

Przewidywany czas przejazdu w zależności od godziny wyjazdu

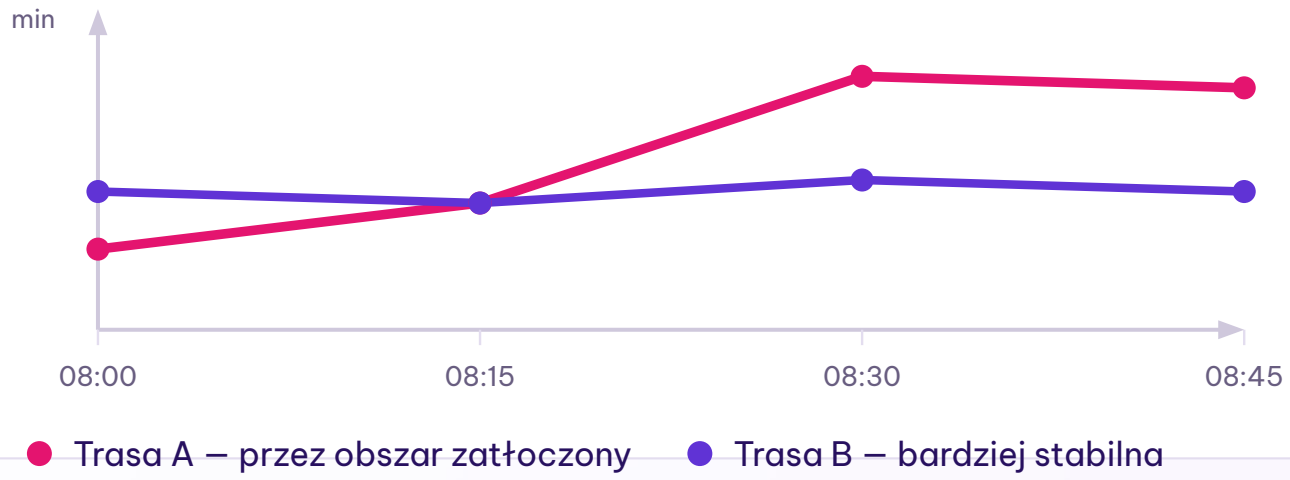


Ilustracja koncepcyjna; mechanizm opisany w raporcie, zał. 4, s. 2–5.

Trasa najlepsza teraz może nie być najlepsza za 30 minut

Warunki ruchu zmieniają się pomiędzy wyznaczeniem planu a realizacją przejazdu.

Przewidywany czas przejazdu w zależności od godziny wyjazdu



PYTANIE BADAWCZE

Czy prognoza ruchu poprawi wybór trasy i pojazdu?

Na wykresie wartości ilustracyjne — nie wyniki projektu.

Ilustracja koncepcyjna; mechanizm opisany w raporcie, zał. 4, s. 2–5.

Prędkość, natężenie i ETA to trzy różne wielkości

To rozróżnienie jest kluczowe do poprawnego odczytania późniejszych wyników.

PRĘDKOŚĆ

45 km/h

Jak szybko porusza się potok pojazdów?

Wynik eksperymentu: prognoza na 1 h

NATĘŻENIE

700 poj./h

Ile pojazdów przejeżdża przez odcinek?

Wynik eksperymentu: 15 i 30 min

ETA / CZAS

18 min

Ile zajmie dojazd od A do B?

Obliczane z sieci i przewidywanej prędkości

Definicje metodyki: raport B+R, zał. 4, s. 4, 18–22.

Trzy eksperymenty — dwa zadania predykcji i test decyzji

Najpierw mierzymy błąd prognozy; potem pytamy, czy prognoza poprawia wynik VRP.

A • PREDYKCJA

Średnia prędkość

horyzont 1 godzina

B • PREDYKCJA

Natężenie ruchu

horyzonty 15 i 30 minut

C • SYMULACJA **AGCRN → macierz czasów → VRP**

Model natężenia oceniono osobno; eksperyment VRP porównywał macierze czasów z prędkości.

Raport B+R, zał. 4, s. 18–25.

ŹRÓDŁA DANYCH

Dwa miliardy punktów GPS nie oznaczają pełnego obrazu ruchu

Floating Car Data (FCD): obserwujemy tylko pojazdy należące do próby pomiarowej.

2 036 055 253
punktów GPS

Warszawa i okolice

01.03.2019–01.03.2022

1
POMIAR GPS
pozycja + czas

→

2
MAP MATCHING
przypisanie do ulicy

→

3
AGREGACJA
prędkość na odcinku

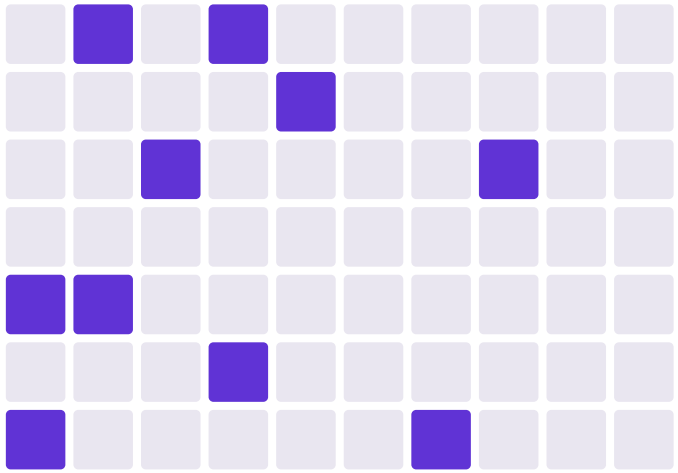
Kontekst: ostrzeżenia pogodowe IMGW + wypadki drogowe

Raport B+R, zał. 4, s. 6–8.

Najtrudniejszy problem: brak obserwacji w ponad 90% pól

Pole oznacza: konkretny odcinek drogi × konkretny przedział 15 minut.

Ilustracja macierzy segment × czas



obserwacja FCD brak obserwacji

Porównaliśmy dwa sposoby uzupełniania

Graf drogowy

wartości z połączonych odcinków

Siatka sześciokątów

uśrednianie w najbliższym obszarze

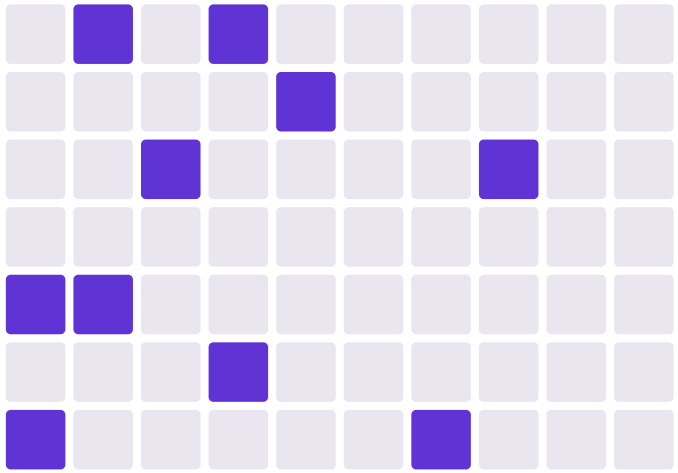
W eksperymencie lepsza była interpolacja grafowa.

Raport B+R, zał. 4, s. 9–10.

Najtrudniejszy problem: brak obserwacji w ponad 90% pól

Pole oznacza: konkretny odcinek drogi × konkretny przedział 15 minut.

Ilustracja macierzy segment × czas



obserwacja FCD brak obserwacji

Porównaliśmy dwa sposoby uzupełniania

Graf drogowy

wartości z połączonych odcinków

Siatka sześciokątów

uśrednianie w najbliższym obszarze

W eksperymencie lepsza była interpolacja grafowa.

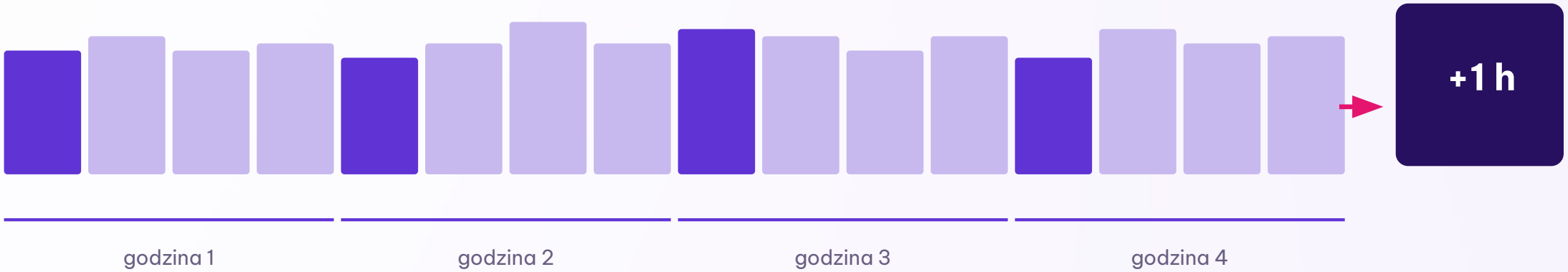
Ryzyko: model uczy się także na wartościach oszacowanych, nie tylko zmierzonych.

Raport B+R, zał. 4, s. 9–10.

Jak z przeszłych obserwacji powstaje prognoza na kolejną godzinę?

Schemat doświadczenia predykcji średniej prędkości.

HISTORIA: 16 obserwacji co 15 minut = 4 godziny



16 wartości → 4 średnie godzinowe → predykcja średniej prędkości

Oddzielnie oceniano predykcję natężenia na 15 i 30 minut.

Raport B+R, zał. 4, s. 21.

Sześć modeli sprawdzało różne sposoby rozumienia ruchu

Punkt odniesienia jest konieczny: złożony model powinien pokazać przewagę nad prostszym.

ARIMA

statystyczny baseline

Przeszłe wartości jednego szeregu

1 model

LSTM

pamięć czasu

Wzorce zmian w kolejnych chwilach

1 model

CNN · SAE

wzorce w danych

Lokalne zależności / reprezentacje

2 modele

TGCN · AGCRN

graf + czas

Zależności między odcinkami

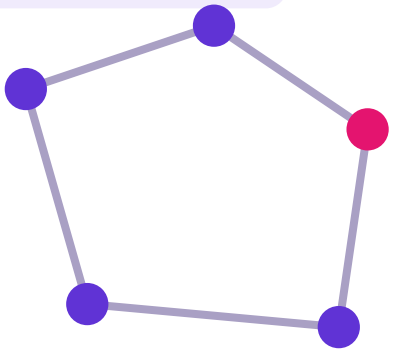
2 modele

Raport B+R, zał. 4, s. 10–15, 21, 25.

AGCRN uczy się, które odcinki są ze sobą powiązane

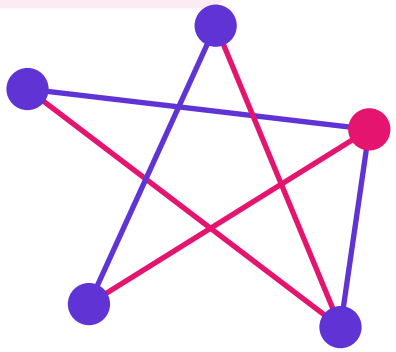
„Sąsiedztwo” w modelu może oznaczać zależność ruchową, a nie tylko wspólną ulicę.

SIEĆ DROGOWA



Fizyczne połączenia ulic

RELACJE WYUCZONE



Powiązanie statystyczne ≠ nowa droga

AGCRN = adaptacyjny graf + mechanizm pamięci czasowej GRU

Raport B+R, zał. 4, s. 11–14, 21; architektura: Bai et al. (2020).

Modelu nie wystarczy wytrenować — trzeba go uczciwie sprawdzić

Dane do uczenia, doboru parametrów i końcowego testu pełnią różne role.

Podział opisany w raporcie

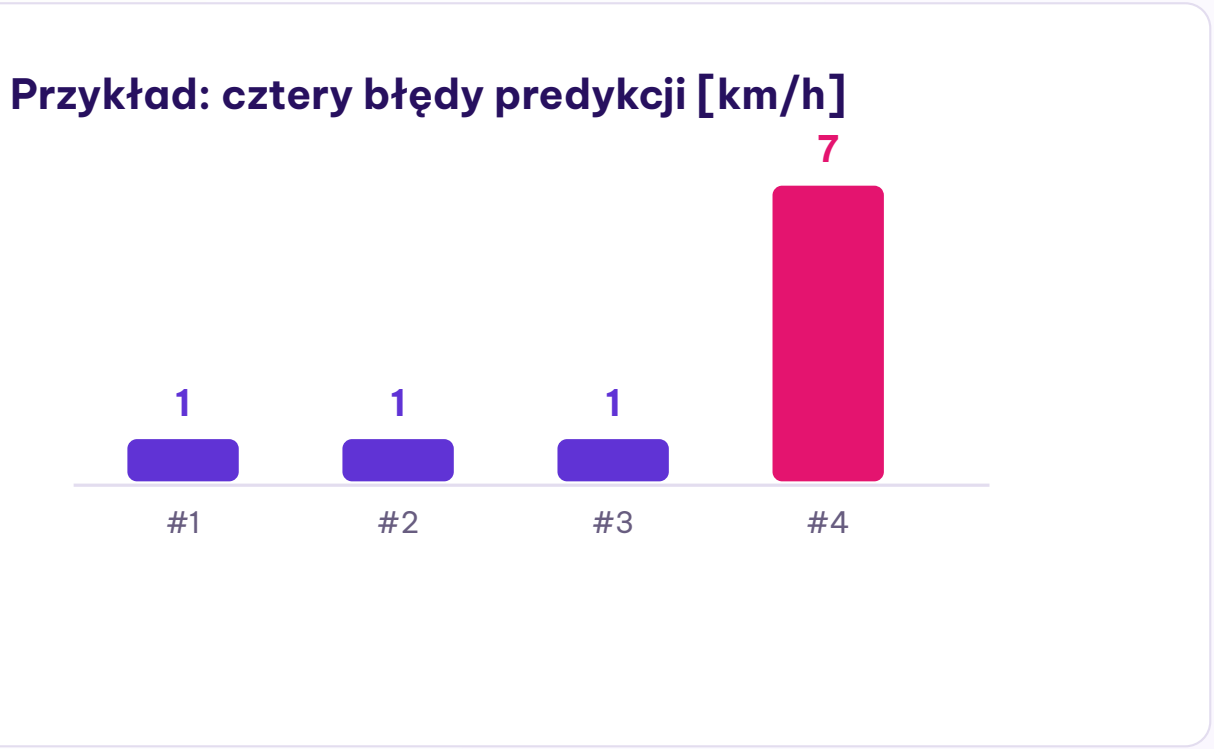
Dobre: wspólne metryki i punkt odniesienia

Do doprecyzowania: czy podział był chronologiczny?

Raport B+R, zał. 4, s. 15; interpretacja podziału — wyjaśnienie metodologiczne.

Dlaczego MAE i RMSE mogą wskazywać różnych zwycięzców?

MAE opisuje typowy błąd bezwzględny, RMSE mocniej obciąża duże pomyłki.



MAE = 2,5 km/h

Średni bezwzględny błąd

RMSE ≈ 3,6 km/h

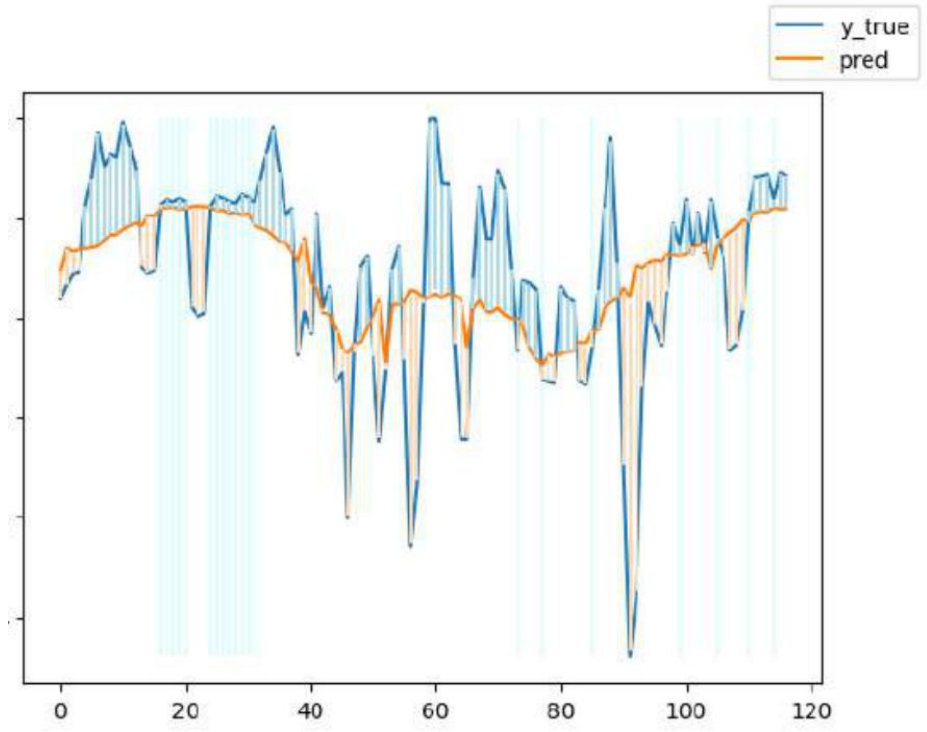
Większa kara za pojedynczy duży błąd

MAPE podaje błąd procentowy, ale nie oznacza „odsetka trafnych prognoz”.

Definicje metryk: raport B+R, zał. 4, s. 17–18; przykładowe liczby: ilustracyjne.

Jedna prognoza może dobrze śledzić trend, ale wygładzać skrajności

Rzeczywisty wykres modelu AGCRN dla wybranego segmentu ulicy.



Jak czytać wykres?

✓ **uchwycony trend**

✓ **stabilniejsza prognoza**

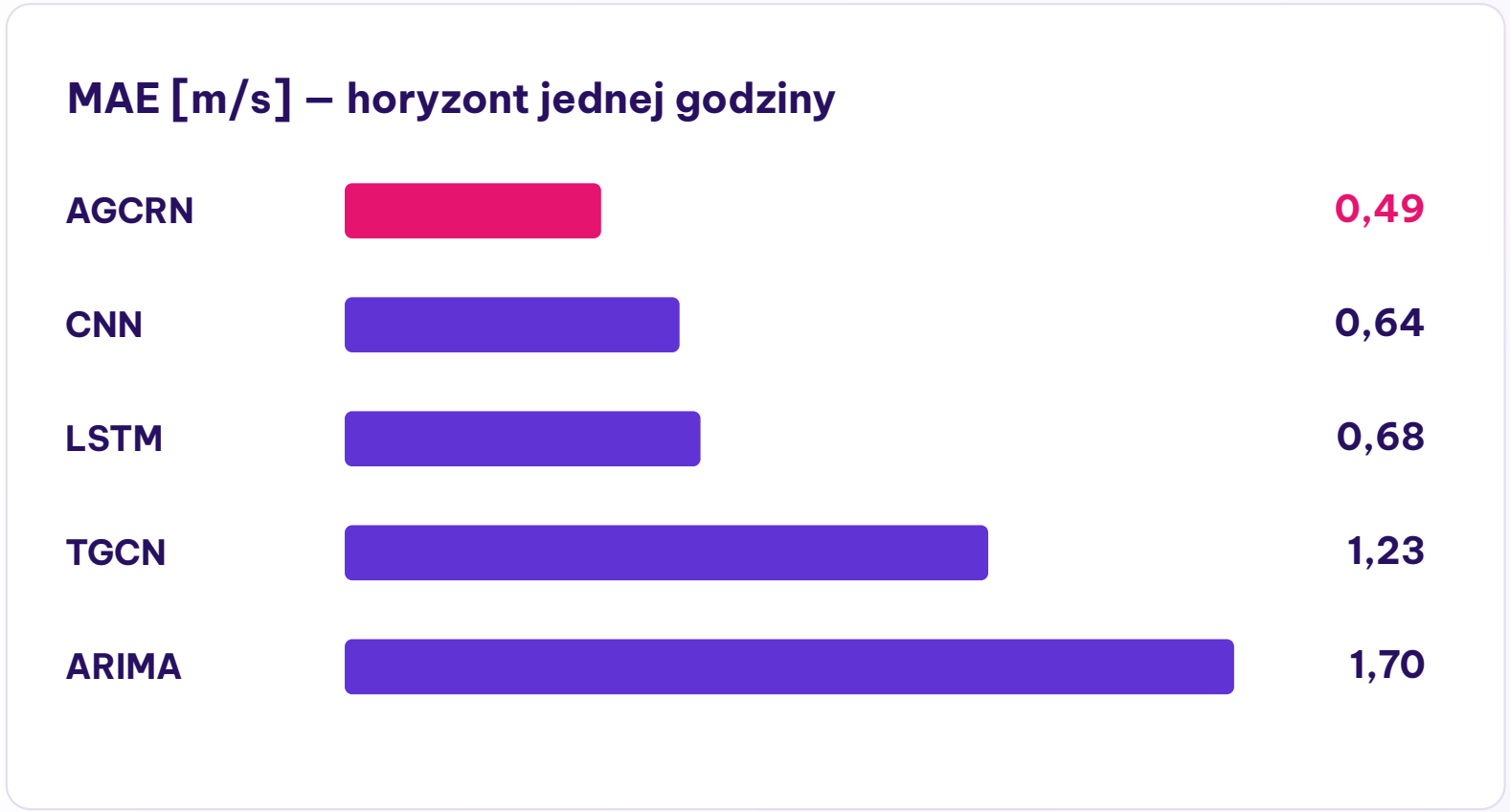
! możliwy błąd w ekstremach

Jeden odcinek nie dowodzi dokładności całego modelu.

Źródło rysunku: raport B+R, zał. 4, rys. 9, s. 17.

AGCRN: najniższy średni błąd prognozy prędkości na 1 h

Porównanie MAE modelu; mniejsze wartości są lepsze.



AGCRN

0,49

m/s MAE ≈ 1,76 km/h

5,75%

MAPE — średni błąd procentowy

Raport B+R, zał. 4, tab. 6, s. 21.

Prognoza natężenia: różne metryki dają różny ranking modeli

W tych tabelach nie mierzymy prędkości, tylko liczbę pojazdów w przedziale czasu.

HORYZONT / METRYKA	AGCRN	CNN	LEPSZY
15 min / MAE	**7,47**	7,98	AGCRN
15 min / RMSE	33,73	**28,57**	CNN
30 min / MAE	**7,58**	11,10	AGCRN
30 min / RMSE	33,67	**29,88**	CNN

AGCRN miał niższy przeciętny błąd; CNN lepiej wypadał w miarze karzącej duże pomyłki.

Raport B+R, zał. 4, tab. 8–9, s. 25.

Prędkość nie jest kosztem trasy — trzeba ją przeliczyć na czas

W uproszczeniu: czas odcinka = jego długość ÷ przewidywana prędkość.

Dla odcinka drogi:

$$t \approx L \div v$$

L — długość odcinka

v̂ — prognozowana prędkość

Przykład ilustracyjny: dwa warianty przejazdu

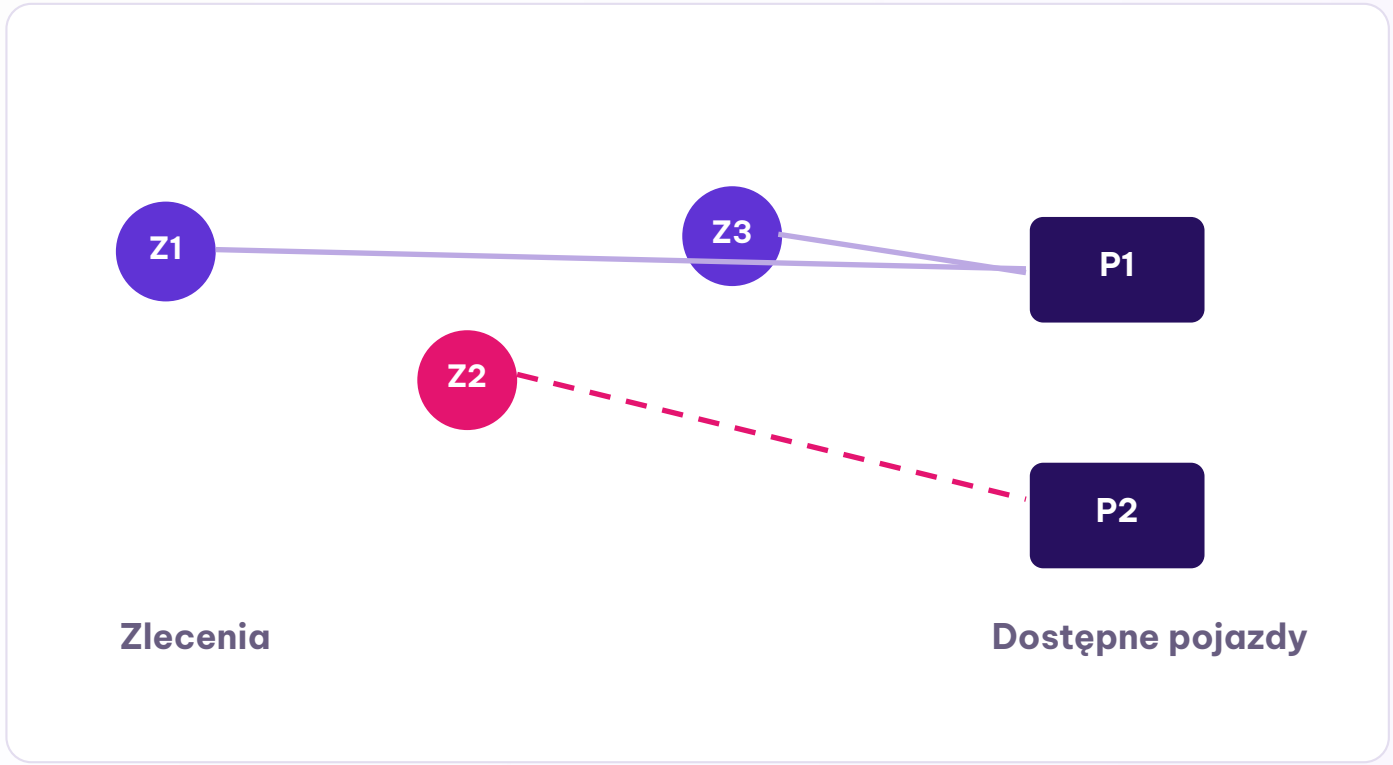
TRASA A	12 km ÷ 20 km/h	**36 min**
TRASA B	14 km ÷ 35 km/h	**24 min**

Dłuższa trasa może mieć krótszy ETA.

Wyprowadzenie dydaktyczne i mechanizm z raportu B+R, zał. 4, s. 4–5, 21–22.

W VRP prognoza wpływa na to, które przydziały są wykonalne

Badany przypadek: dynamiczne współdzielenie przejazdów (ride-pooling).



Algorytm rozstrzyga:

- który pojazd obsłuży zlecenie
- w jakiej kolejności stopów
- czy dotrzymamy ograniczeń czasu

Aktualizacja ETA może zmienić wybór.

Raport B+R, zał. 3, s. 10–20; zał. 4, s. 21–22.

Jak wyizolowaliśmy wpływ informacji o ruchu na wynik VRP?

Trzy źródła macierzy czasów; ta sama sieć, flota i metoda trasowania.

AGCRN

Prognoza prędkości

HISTORIA

Średnia z 6 tygodni

RUCH SWOBODNY

Bez prognozy zatłoczenia

STAŁY ALGORYTM • STAŁY SCENARIUSZ • ZMIENNA MACIERZ CZASÓW

10 000	17 h	210 408
pojazdów	07:00–24:00	zleceń w opisie testu

Raport B+R, zał. 4, s. 21–22, tab. 7.

AGCRN: najkrótszy średni czas oczekiwania w symulacji

To wynik operacyjny floty, nie bezpośredni wskaźnik błędu ETA.

Średni czas oczekiwania na pojazd

-18%

vs historia

-24%

vs ruch swobodny

Raport B+R, zał. 4, tab. 7, s. 22.

Pozostałe wyniki poprawiły się nierównomiernie

Wyższa obsada pojazdu nie musi oznaczać lepszego czasu oczekiwania.

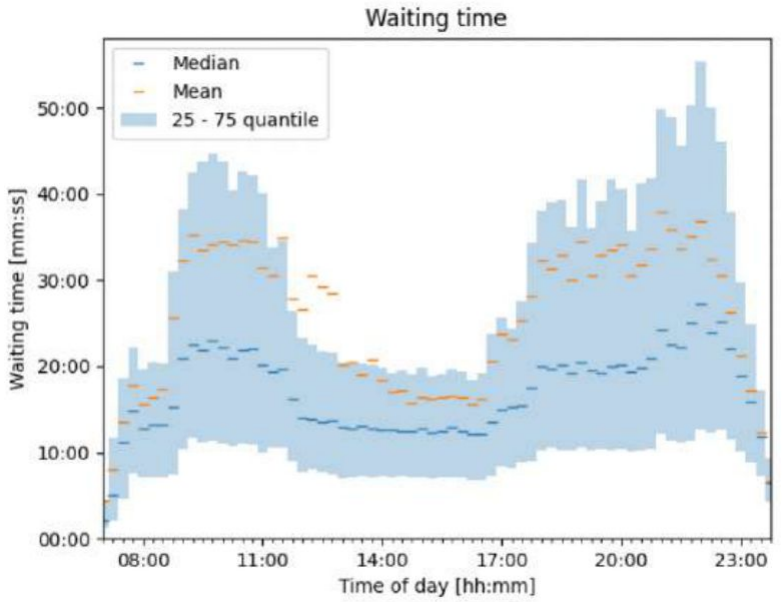
WSKAŹNIK	AGCRN	HISTORIA	RUCH SWOBODNY
Zlecenia obsłużone	**69,38%**	67,07%	68,86%
Udział pustych km	**11,59%**	12,69%	11,96%
Obsada niepustego auta	1,67	1,60	**1,72**

Raport B+R, zał. 4, tab. 7, s. 22.

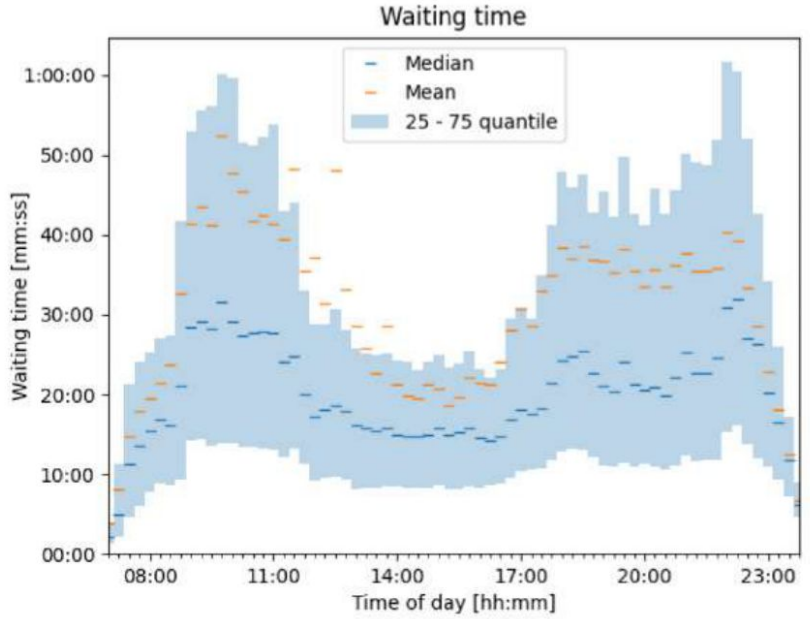
Średnia ukrywa dynamikę: kiedy modele różnią się najbardziej?

Wykresy z raportu: rozkład czasu oczekiwania w ciągu dnia dla dwóch wariantów.

AGCRN



HISTORIA / 6 TYGODNI



Uwaga: różne zakresy osi Y — nie porównuj wysokości krzywych bez odczytania skali.

Raport B+R, zał. 4, rys. 12–13, s. 23.

Co wynik rzeczywiście potwierdza — a czego jeszcze nie?

Rozdzielenie walidacji modelu, efektu symulacyjnego i efektu produkcyjnego.

WYKAZANO

- Porównanie modeli na badanych danych
- Niższy MAE prędkości dla AGCRN
- Krótsze oczekiwanie w symulacji VRP

NIE WYKAZANO WPROST

- Błędu ETA na rzeczywistych przejazdach
- 18% korzyści w realnym wdrożeniu
- Statystycznej istotności efektu VRP

DO DOPRECYZOWANIA

- Chronologia podziału train/test
- Wkład pogody i incydentów (ablacja)
- Powtarzalność i zakres innych miast

Wniosek: mamy wynik eksperymentalny i symulacyjny — nie deklarację gwarantowanego efektu wdrożeniowego.

Wyniki raportu B+R, zał. 4, s. 21–25; ograniczenia są interpretacją dokumentacji.

Trzy wnioski i trzy naturalne kierunki dalszych badań

Od danych i grafu, poprzez trafność prognozy, do użyteczności decyzji.

01	**Jakość danych i interpolacji**	Duża liczba pomiarów nie usuwa problemu braków w sieci.
02	**Predykcja czasowo-przestrzenna**	AGCRN dał najniższy MAE prędkości na badanym zbiorze.
03	**Wpływ na decyzje transportowe**	W symulacji lepsza macierz czasów skróciła oczekiwanie.

Następne kroki **walidacja ETA • kolejne miasta • testy w eksploatacji**

Podsumowanie na podstawie raportu B+R, zał. 4, s. 21–25.

Podstawa metodyczna i literatura

Do pozostawienia na ekranie podczas pytań.

- Aleet (2023). Raport z realizacji fazy badawczej B+R, POIR.01.01.01-00-1019/20, załącznik 4 (etap 3).
- **Opioła P., Jasiński P., Witkowski I., Stec K., Reps B., Marczuk K. (2023). Traffic Prediction for VRP in Intelligent Transportation Systems. Springer LNNS 724.**
- Bai L. i in. (2020). Adaptive Graph Convolutional Recurrent Network for Traffic Forecasting. NeurIPS 33.
- Zhao L. i in. (2020). T-GCN: A Temporal Graph Convolutional Network for Traffic Prediction. IEEE T-ITS.
- Yang C., Gidófalvi G. (2018). Fast map matching integrating HMM with precomputation. IJGIS.

Publikacja naukowa: https://doi.org/10.1007/978-3-031-35314-7_14

Fundusze Europejskie Inteligentny Rozwój | Rzeczpospolita Polska | Narodowe Centrum Badań i Rozwoju | Unia Europejska Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego

Raport B+R, zał. 4, s. 26.