

# Katedra Systemów Transportowych

## Mobilność

dr inż. Rafał Kucharski<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Katedra Systemów Transportowych  
Politechnika Krakowska

Kraków, 2018



# Mobilność

## Definicje

### Natężenie ruchu

Liczba pojazdów przejeżdżająca przez dany odcinek drogi w określonym czasie,  
np. *2 000 pojazdów na godzinę szczytu na kierunek w Alejach (Jubilat)*

### Potok pasażerski

Liczba pasażerów używających pojazdów komunikacji zbiorowej na danym odcinku w danym czasie,  
np. *18 000 pasażerów na kierunek pomiędzy stacją metra Centrum a Świętokrzyska w Warszawie w godzinie szczytu.*

### Czas przejazdu

Średni czas przejazdu odcinka (miedzy kolejnymi skrzyżowaniami, lub przystankami) lub relacji skrajnej (od dołączenia do kolejki do opuszczenia tarczy) w godzinie szczytu, np. *15 minut pomiędzy przystankiem Politechnika a Nowy Kleparz o godzinie 16:15*



# Mobilność

## Definicje

### Podróż

- rano z domu po bułki
- z domu do pracy
- z pracy na spotkanie
- ze szkoły na gimnastykę
- z pracy po dzieci z przedszkola
- ...

### Mobilność

Potrzeba użytkowników (klientów) systemu transportowego przemieszczania się: **znalezienia się w innym miejscu przy jak najmniejszej uciążliwości.**

Podstawowa przyczyna dla której potrzebne są systemy transportowe (podaż).



## Aktywność

Przebywanie w określonym miejscu przez pewien okres czasu w związku z realizacją potrzeby.

Podstawowe aktywności:

- **DOM** (sen, rodzina, posiłki, zabawa, odpoczynek, wizyty, ...)
- **PRACA**
- **SZKOŁA**  
oraz
- zakupy
- sprawy urzędowe
- rozrywka
- sport
- wizyta
- jedzenie
- odwożenie, odprowadzanie
- ...

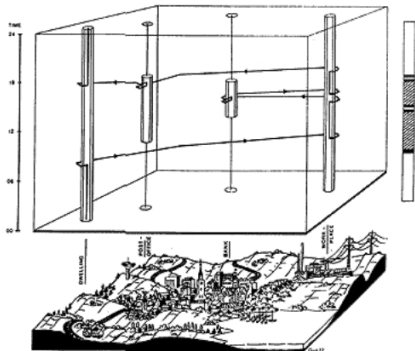


# Łańcuch

## Dobowy Łańcuch Aktywności

### Łańcuch aktywności

Sekwencja aktywności realizowanych przed daną osobę w ciągu doby



Cylinder czasoprzestrzenny



# Łańcuchy podróży

Łańcuch zazwyczaj kończy i zaczyna się w domu.

## Podstawowe łańcuchy trójelementowe

- Dom -> Praca -> Dom (pracujący)
- Dom -> Szkoła -> Dom (uczniowie)
- Dom -> Zakupy -> Dom (bezrobotni, emeryci, niepracujący, urlop, itp.)

## Dodatkowa aktywność po podstawowej

- Dom -> Praca -> Zakupy -> Dom
- Dom -> Szkoła -> Rozrywka -> Dom
- Dom -> Lekarz -> Odbieranie -> Dom

## Dodatkowa aktywność przed podstawową

- Dom -> Odwożenie -> Praca -> Zakupy -> Dom
- Dom -> Sport -> Szkoła -> Dom
- Dom -> Odwożenie -> Lekarz -> Dom

# Liczność łańcuchów (Poznań 2010)

łańcuch	liczba podróży	udział
---------	----------------	--------



## Liczność łańcuchów (Poznań 2010)

łańcuch	liczba podróży	udział
DPD	5342	36.46%





## Liczność łańcuchów (Poznań 2010)

łańcuch	liczba podróży	udział
DPD	5342	36.46%
DSD	2382	16.26%



## Liczność łańcuchów (Poznań 2010)

łańcuch	liczba podróży	udział
DPD	5342	36.46%
DSD	2382	16.26%
DID	2032	13.87%



## Liczność łańcuchów (Poznań 2010)

łańcuch	liczba podróży	udział
DPD	5342	36.46%
DSD	2382	16.26%
DID	2032	13.87%
DUD	1031	7.04%



## Liczność łańcuchów (Poznań 2010)

łańcuch	liczba podróży	udział
DPD	5342	36.46%
DSD	2382	16.26%
DID	2032	13.87%
DUD	1031	7.04%
DPDID	347	2.37%



## Liczność łańcuchów (Poznań 2010)

łańcuch	liczba podróży	udział
DPD	5342	36.46%
DSD	2382	16.26%
DID	2032	13.87%
DUD	1031	7.04%
DPDID	347	2.37%
DPDUD	211	1.44%



## Liczność łańcuchów (Poznań 2010)

łańcuch	liczba podróży	udział
DPD	5342	36.46%
DSD	2382	16.26%
DID	2032	13.87%
DUD	1031	7.04%
DPDID	347	2.37%
DPDUD	211	1.44%
DSDID	181	1.24%



## Liczność łańcuchów (Poznań 2010)

łańcuch	liczba podróży	udział
DPD	5342	36.46%
DSD	2382	16.26%
DID	2032	13.87%
DUD	1031	7.04%
DPDID	347	2.37%
DPDUD	211	1.44%
DSDID	181	1.24%
DIDID	178	1.21%



## Liczność łańcuchów (Poznań 2010)

łańcuch	liczba podróży	udział
DPD	5342	36.46%
DSD	2382	16.26%
DID	2032	13.87%
DUD	1031	7.04%
DPDID	347	2.37%
DPDUD	211	1.44%
DSDID	181	1.24%
DIDID	178	1.21%
DIID	156	1.06%





## Liczność łańcuchów (Poznań 2010)

łańcuch	liczba podróży	udział
DPD	5342	36.46%
DSD	2382	16.26%
DID	2032	13.87%
DUD	1031	7.04%
DPDID	347	2.37%
DPDUD	211	1.44%
DSDID	181	1.24%
DIDID	178	1.21%
DIID	156	1.06%
DPID	149	1.02%



## Liczność łańcuchów (Poznań 2010)

łańcuch	liczba podróży	udział
DPD	5342	36.46%
DSD	2382	16.26%
DID	2032	13.87%
DUD	1031	7.04%
DPDID	347	2.37%
DPDUD	211	1.44%
DSDID	181	1.24%
DIDID	178	1.21%
DIID	156	1.06%
DPID	149	1.02%
DPUD	96	0.66%



# Macierz motywacji podróży

Tabela krzyżowa motywacja początku podróży \* motywacja końca podróży

Liczebność									
		motywacja końca podróży							Ogółem
		do domu	do pracy	do szkoły	uczelnię	w WOH	poza WOH	inne	
motywacja początku podróży	dom	13	7865	1511	638	711	1342	3004	15084
	praca	7244	334	7	20	241	338	568	8752
	szkoła	1472	1	5	0	5	12	44	1539
	wyższa uczelnia	560	20	0	13	15	22	49	679
	WOH	988	16	2	0	24	17	47	1094
	poza WOH	1691	49	2	2	23	112	95	1974
	inne	3211	326	15	15	78	142	465	4252
Ogółem		15179	8611	1542	688	1097	1985	4272	33374

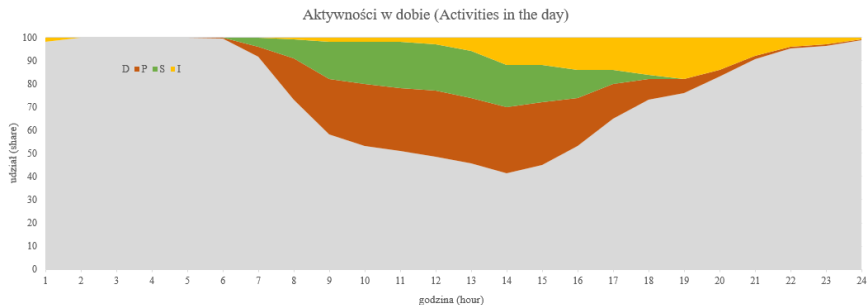
WBR 2015



## Doba - aktywnosci i podroze

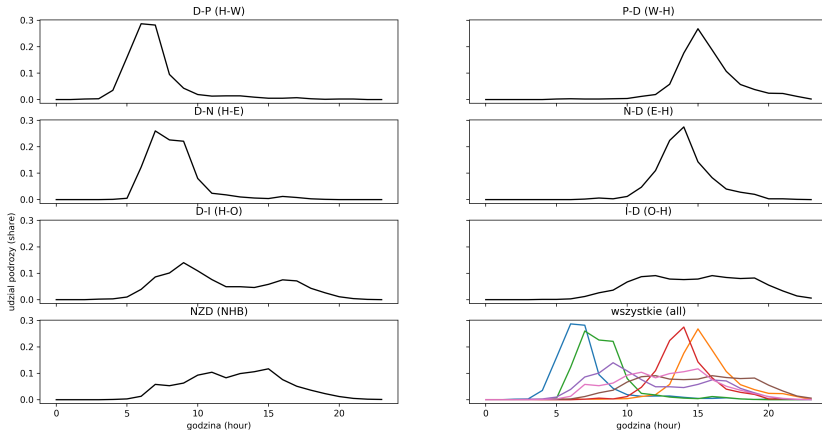


# Aktywności

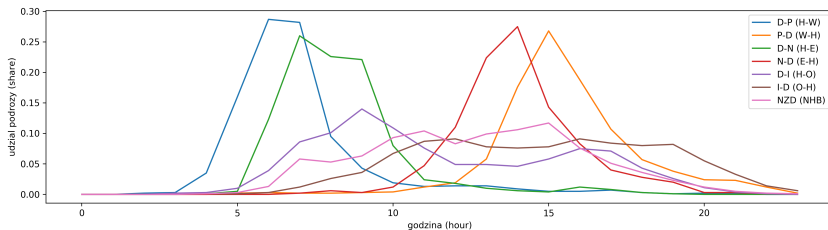


# Rozkład dobowy podróży

Rozkład dobowy podróży (temporal trip distribution)



# Rozkład dobowy podróży



# Rozkład dobowy podróży

od	do	D-P	P-D	D-N	N-D	D-I	I-D	NZD
	0	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
0	1	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
1	2	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
2	3	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
3	4	0.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.2%	0.0%	0.0%
4	5	3.5%	0.0%	0.1%	0.0%	0.3%	0.1%	0.1%
5	6	16.0%	0.2%	0.5%	0.0%	1.0%	0.1%	0.3%
6	7	28.7%	0.3%	12.3%	0.0%	3.9%	0.3%	1.3%
7	8	28.2%	0.2%	26.0%	0.2%	8.6%	1.2%	5.8%
8	9	9.5%	0.2%	22.6%	0.6%	10.1%	2.6%	5.3%
9	10	4.3%	0.3%	22.1%	0.3%	14.0%	3.6%	6.3%
10	11	1.9%	0.4%	8.0%	1.2%	10.9%	6.7%	9.3%
11	12	1.3%	1.2%	2.4%	4.7%	7.6%	8.7%	10.4%
12	13	1.4%	1.9%	1.8%	11.0%	4.9%	9.1%	8.3%
13	14	1.4%	5.8%	1.0%	22.4%	4.9%	7.8%	9.9%
14	15	0.9%	17.6%	0.6%	27.5%	4.6%	7.6%	10.6%
15	16	0.5%	26.8%	0.4%	14.3%	5.8%	7.8%	11.7%
16	17	0.5%	18.8%	1.2%	8.3%	7.5%	9.1%	7.6%
17	18	0.7%	10.7%	0.8%	4.0%	7.1%	8.4%	5.1%
18	19	0.3%	5.7%	0.3%	2.8%	4.3%	8.0%	3.6%
19	20	0.1%	3.8%	0.1%	2.0%	2.6%	8.2%	2.3%
20	21	0.2%	2.4%	0.0%	0.3%	1.1%	5.5%	1.2%
21	22	0.2%	2.3%	0.0%	0.3%	0.4%	3.3%	0.5%
22	23	0.0%	1.2%	0.0%	0.1%	0.1%	1.4%	0.2%
23	24	0.0%	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.6%	0.1%





## Model 4 stadiowy



# Model 4 stadiowy

## Wprowadzenie

- analityczny
- zgodny z KBR
- czytelny
- powtarzalny
- wartości średnie (oczekiwane)
- opisuje podróże (nie łańcuchy)



# Model 4 stadiowy

opis

1	czy?/jak często?	produkcja i atrakcja rejonów	$q_o, q_d$	generacja podróży
2	dokąd?	wieżba ruchu	$q_{od}$	grawitacja
3	czym?	udziały środków transportu	$p_{od}$	wybór środka transportu
4	którędy?	obciążenia ścieżek	$q_a$	wybór trasy



# Model 4 stadiowy

- 1 Na etapie **generacji ruchu** określamy liczbę podróży rozpoczynanych  $q_o$  i kończonych  $q_d$  w każdym rejonie używając formuł generacji zgodnie z zagospodarowaniem (zmienne rejonu  $X_o$ ) i parametrami określonymi w KBR.
- 2 Na etapie **wyboru celu podróży** określamy liczbę podróży między rejonami  $q_{od}$  na podstawie:
  - produkcji w źródle  $q_o$ ,
  - atrakcji u celu  $q_d$
  - odległości pomiędzy rejonami (koszt  $c_{od}$ , lub czas  $t_{od}$ )
- 3 Na etapie **wyboru środka transportu** dla każdej pary rejonów określamy prawdopodobieństwa  $p_{od}$  wyboru każdego z rozważanych środków transportu:
  - pieszo,
  - komunikacją zbiorową,
  - samochodem,
  - ....
- 4 Na etapie **wyboru trasy** dla każdej pary źródło cel określ optymalną trasę: pieszą, komunikacją zbiorową, samochodem.

$$\{q_o, q_d\} \rightarrow q_{od} \rightarrow q_{od} \times p_m \rightarrow q_a$$

(1)



# Generacja Ruchu



# Generacja ruchu

Ujęcie statystyczne

## Produkcja

Liczba podróży rozpoczynanych w danym okresie czasu w danym obszarze w danej motywacji.  
np. *Liczba podróży rozpoczynanych w dobie na Osiedlu Kościuszkowskim z domu do pracy*

## Atrakcja

Liczba podróży kończonych w danym okresie czasu w danym obszarze w danej motywacji.  
np. *Liczba podróży kończonych w dobie na Politechnice Krakowskiej z domu na uczelnię.*

## Ruchliwość

Średnia liczba podróży wykonywana przez osobę w dobie.

## Liczba podróży

Najogólniej - ruchliwość razy liczba mieszkańców

$$T = \alpha \times LM_i$$



# Czas wykonywania aktywności



## Wybór celu podróży





# Wybór celu podróży

## Sytuacja

Wiemy gdzie i ile podróży rozpoczyna się (generacja) i kończy (atrakcja)  
**Nie wiemy** jakie to są podróże, nie wiemy jak początki łączą się z końcami.

## Wybór

Podróżny:

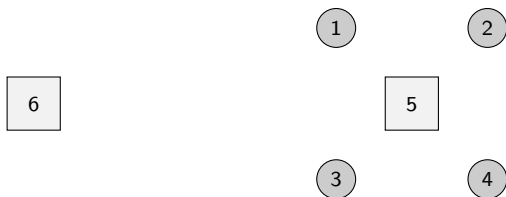
- jest w określonym miejscu (początek)
- z określoną potrzebą (kolejną aktywnością w łańcuchu)
- podejmuje decyzję gdzie zaspokoi potrzebę - wybiera koniec podróży



# Wybór celu podróży

## Przykład

Cztery rejony (1-4) generują podróże, w sumie 1000 podróży które mogą być zaspokojone w dwóch rejonach, bliższym nr 5 i dalszym nr 6.

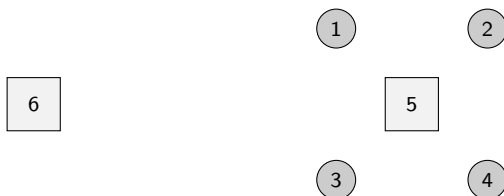


$o, d$	P	A
1	100	-
2	200	-
3	300	-
4	400	-
5	-	200
6	-	800



# Wybór celu podróży

Przykład



$o, d$	P	A
1	100	-
2	200	-
3	300	-
4	400	-
5	-	200
6	-	800

Podróże fakultatywne o dużym oporze przestrzeni

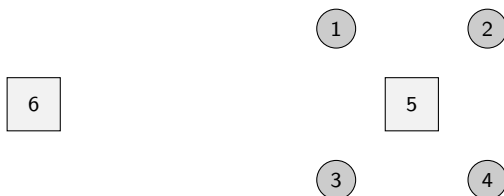
np. na zakupy do najbliższej Biedronki

$o, d,$	5	6
1	90	10
2	200	0
3	270	30
4	400	0



# Wybór celu podróży

Przykład



$o, d$	P	A
1	100	-
2	200	-
3	300	-
4	400	-
5	-	200
6	-	800

Podróże fakultatywne o istotnej atrakcyjności celu podróży

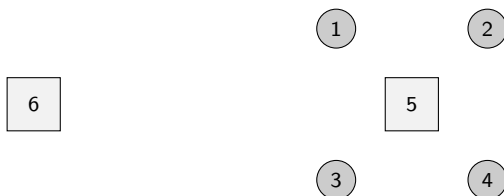
np. do galerii handlowej przy dużej różnicy oferty (uwzględnione w atrakcji)

$o, d,$	5	6
1	20	80
2	40	160
3	60	240
4	80	320



# Wybór celu podróży

Przykład



$o, d$	P	A
1	100	-
2	200	-
3	300	-
4	400	-
5	-	200
6	-	800

## Podróże obligatoryjne o ograniczone pojemności celu podróży

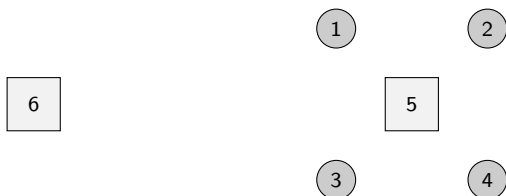
np. do pracy przy określonej liczbie miejsc pracy (górna granica liczby podróży)

$o, d,$	5	6
1	20	80
2	40	160
3	60	240
4	80	320



# Wybór celu podróży

Przykład



$o, d$	P	A
1	100	-
2	200	-
3	300	-
4	400	-
5	-	200 -> 800
6	-	800 -> 200

Podróże obligatoryjne gdzie podaż zdążyła dopasować się do popytu

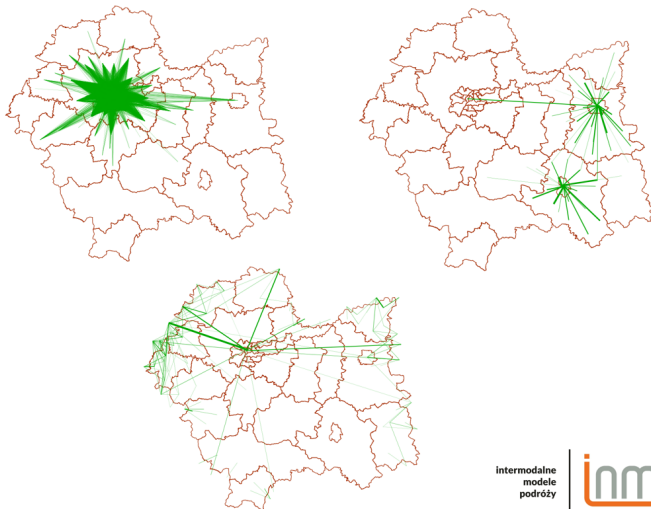
np. do przedszkola

$o, d,$	5	6
1	80	20
2	1600	40
3	240	60
4	320	80



# Faktyczna struktura przemieszczeń

Ujawniona np. w śladach telefonów komórkowych



intermodalne  
modele  
podróży

inmo<sup>3</sup>



## Popyt na nowej inwestycji





# Potrzeba modelowania

## Model stanu istniejącego

Jest **zupełnie** niepotrzebny, bezużyteczny.

Możemy zmierzyć/zbadać/zaobserwować praktycznie każdą z miar uzyskiwanych w modelu. Nie ma potrzeby jej modelować, można ją zmierzyć.

Jeśli jedyne nasze pytania o system transportowy dotyczą stanu istniejącego, to model jest zbędny.

## Model prognostyczny

Model jest za to **konieczny** do określenia stanu sieci w przyszłości, w szczególności:

- po otwarciu nowej drogi
- linii tramwajowej
- ścieżki rowerowej
- wprowadzeniu strefy płatnego parkowania
- budowie nowego osiedla/fabryki/galerii



# Popyt na nowej inwestycji

## Przykład

Dzisiaj otwarto nową linię tramwajową w Krakowie.

Łączy ona Mistrzejowice, przez Park Wodny, Rondo Młyńskie, Wieczystą i dalej do Ronda Mogińskiego.

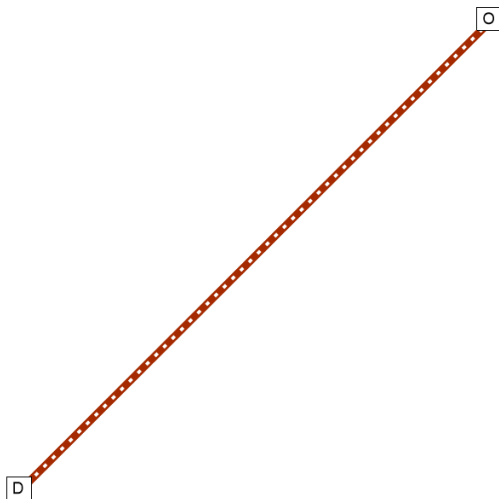
Pierwszego dnia po otwarciu kursem o 07:43 podróżuje 100 pasażerów.

Skąd oni się wzięli?



# Popyt na nowej inwestycji

Przykład



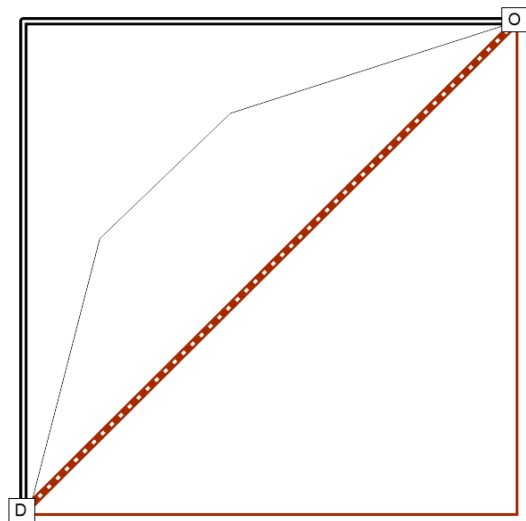
Net  
Type number

tram



# Popyt na nowej inwestycji

Przykład



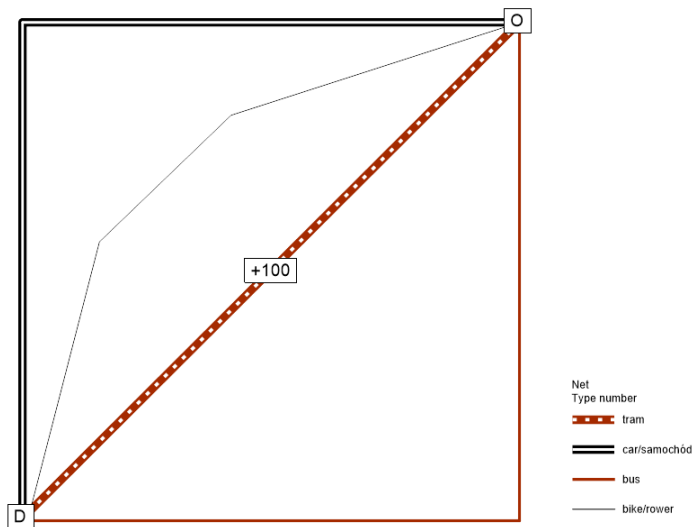
Net  
Type number

- tram
- car/samochód
- bus
- bike/rower



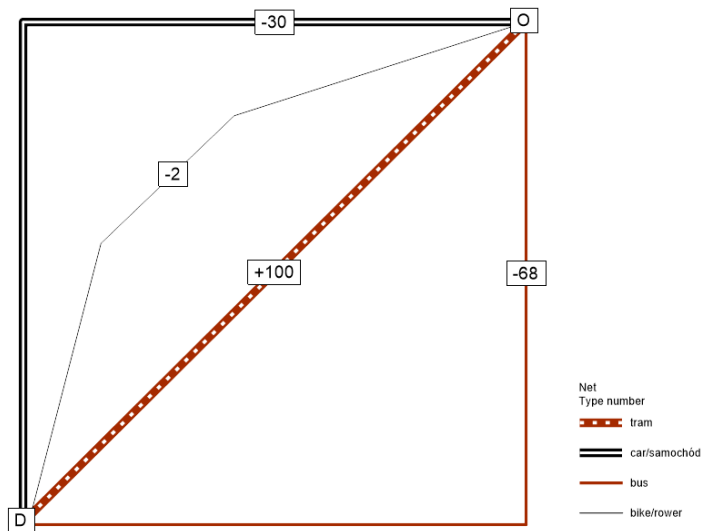
# Popyt na nowej inwestycji

Przykład



# Popyt na nowej inwestycji

Przykład



# Model 4 stadiowy

wykorzystanie w prognozowaniu

1	<b>generacja podróży</b>	zwiększenie liczby podróży	nowe zmienne objaśniające (miejsca pracy, ludność, powierzchnia handlowa)
2	<b>grawitacja</b>	zmiana celów podróży	wzrost liczby podróży na usprawnionych relacjach
3	<b>wybór środka transportu</b>	zmiana w wyborze	większe udziały usprawnionych środków transportu
4	<b>wybór trasy</b>	obciążenie innych ścieżek	pojawienie się ścieżek o niższym koszcie



# Model 4 stadiowy

wykorzystanie w prognozowaniu

Kto wybierze nową linię tramwajową:

1	nowi mieszkańcy
2	podróżujący w nowych kierunkach
3	przesiadający się z innych środków transportu
4	przesiadający się z innych tras





## Wybór trasy



# Wybór ścieżki w sieci drogowej

Dla przedstawionej poniżej sieci drogowej określmy obciążenie (liczbę pojazdów  $q_a$ ) na moście (odcinek przerywany) i wynikający z niego czasu przejazdu ( $t_a$ ). Wartości w rejonach oznaczają liczbę pojazdów jaka w ciągu godziny szczytu porannego chce dojechać do celu podróży. Załóż, że wszystkie odcinki są równe i czas przejazdu każdego z nich w ruchu swobodnym wynosi 1 minutę.

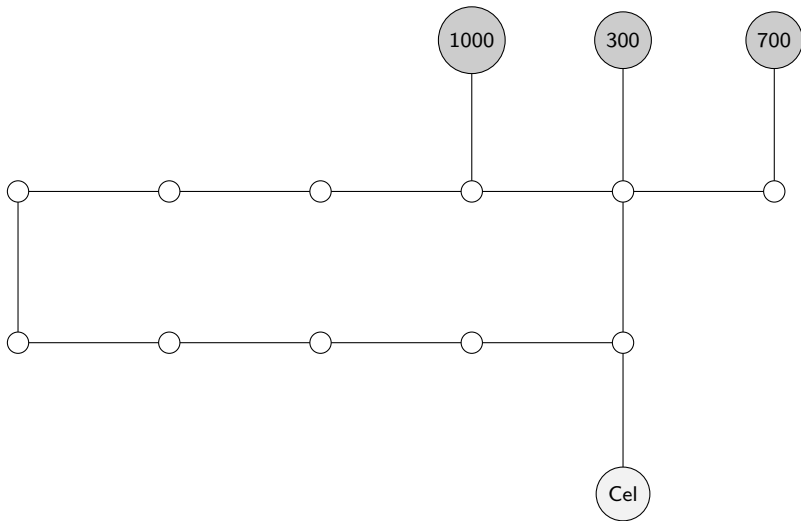
- ❶ załóż, że przepustowość wszystkich odcinków jest nieograniczona.
- ❷ załóż, że przepustowość ( $Q_a$ ) mostu (odcinek przerywany) wynosi 500 pojazdów na godzinę, pozostałe odcinki mają nieograniczoną przepustowość. Czas przejazdu oszacuj korzystając z funkcji:  $t_a = t_a^0 \cdot (1 + (q_a/Q_a)^2)$ . Podaj szacunkową wartość zbliżoną do warunków równowagi Wardop'a.



# Wybór ścieżki w sieci

przykład

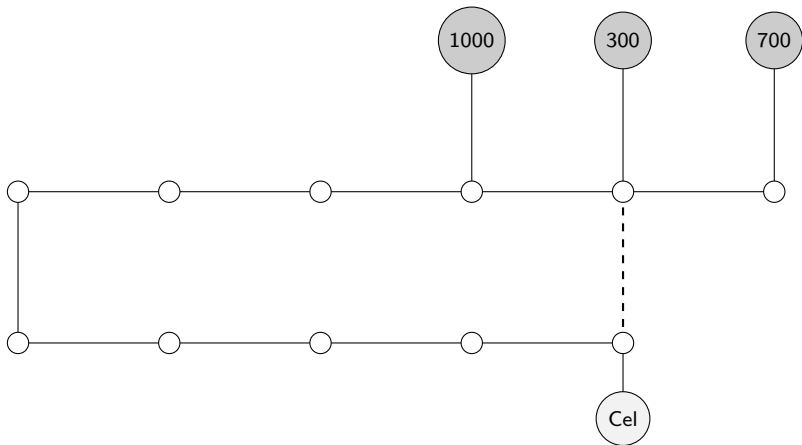
A: przepustowość wszystkich odcinków jest nieograniczona.



## Wybór ścieżki w sieci

### przykład

B: przepustowość ( $Q_a$ ) mostu (odcinek przerywany) wynosi 500 pojazdów na godzinę, pozostałe odcinki mają nieograniczoną przepustowość. Czas przejazdu oszacuj korzystając z funkcji:  $t_a = t_a^0 \cdot (1 + (q_a/Q_a)^2)$ . Podaj szacunkową wartość zbliżoną do warunków równowagi Wardop'a.



# Efektywność



# Efektywność ekonomiczna

$$E = \frac{B}{C}$$

iloraz kosztów ( $C$ ) i korzyści ( $B$ ).

Powinien być większy od 1, a więc  $B > C$ .

## Koszty

inwestycji, przygotowania, utrzymania, amortyzacji, eksploatacji, gruntów, ...

## Korzyści

spadek emisji, hałasu, wypadków,

ale głównie **oszczędności czasu** - uzyskiwane z modelu



# Efektywność ekonomiczna

## Praca przewozowa

Pojazdogodziny, pasażerogodziny

$$C_t = \sum_{p \in P} t_p = \sum_{a \in A} q_a \times t_a$$

Całkowity czas wszystkich podróży w sieci (w godzinie szczytu)

## Korzyści

Spadek w pojazdogodzinach względem wariantu bezinwestycyjnego (0) względem analizowanego wariantu inwestycyjnego ( $i$ ):

$$B_i = C_{t,0} - C_{t,i}$$



# Efektywność ekonomiczna

## Korzyści

$$\begin{aligned} B_i &= 300 \text{poj} h / h_{\text{szczytu}} \\ &= 300 \text{poj} h / h_{\text{szczytu}} \times 30 \text{zł} / h = 9000 \text{zł} \\ &= 9000 \text{zł} / 10\% = 90000 \text{zł} / \text{dobę} \\ &= 90000 \text{zł} / \text{dobę} \times 300 \text{dni} / \text{rok} = 27 \text{mln zł} / \text{rok} \\ &= 27 \text{mln zł} / \text{rok} \times 25 \text{lat} = 675 \text{mln zł} / \text{okres analizy} \end{aligned}$$





# Podsumowanie

Dziękuję za uwagę

Rafał Kucharski, rkucharski(at)pk.edu.pl

