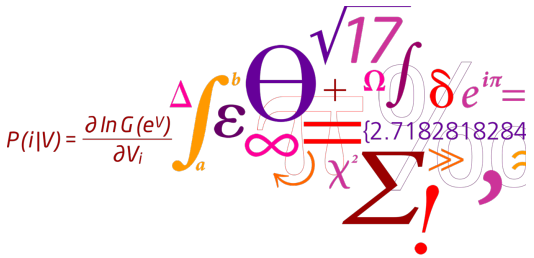
Kortlægning og kvantificering af cyklistforsinkelser

Mads Paulsen

Adjunkt (tenure-track)
Institut for Teknologi, Ledelse og Økonomi
Danmarks Tekniske Universitet

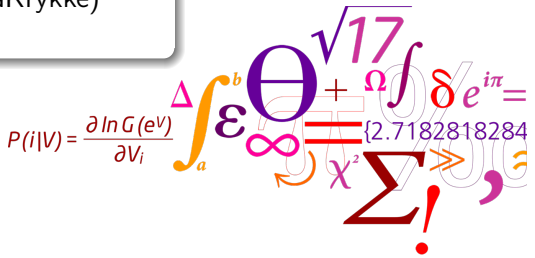
26 August 2026



Projekt fra Vejdirektoratets Cykelpulje

DataKrykke

Arbejdet er en del af projektet "Datadrevet kortlægning og kvantificering af cyklistforsinkelser (DataKrykke)" finansieret af Vejdirektoratets Cykelpulje.



Dagens præsentation

Kort fortalt

- Analysér cyklisthastigheder baseret på GPS-data fra cyklister
- Identificér steder med frekvente og/eller store forsinkelser
- Kvantificér og monetisér forsinkelser ved disse steder



DTU

Agenda

1. Baggrund
2. Metode
3. Foreløbige resultater
4. Konklusioner og perspektiver

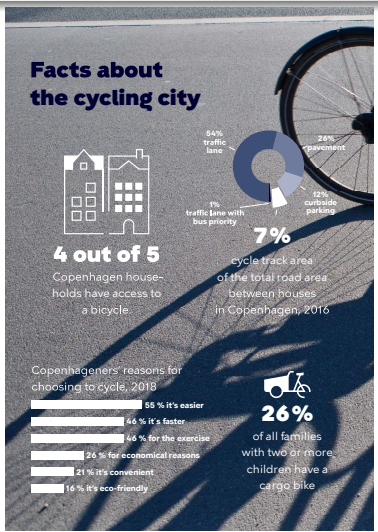


Agenda

1. Baggrund
2. Metode
3. Foreløbige resultater
4. Konklusioner og perspektiver



Hurtigt og nemt

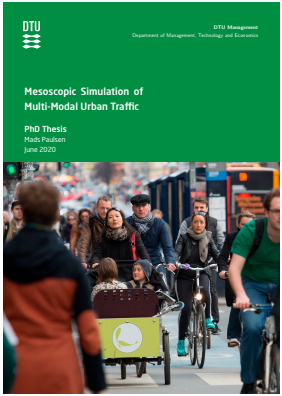


- Årsager til at Københavnere cykler (2018):
  - 55%: Det er nemmere
  - 46%: Det er hurtigere
- Fravær af unødige forsinkelser er vigtige!

Kilde: **The City of Copenhagen (2019).** ***Copenhagen - City of Cyclists.*** **The Bicycle Account 2018. The Technical and Environmental Administration**

Tidligere modeller for cyklistforsinkelser

- Simulering af trængselsforsinkelser på cykelstier **(Paulsen et al., 2019)**
  - Kun små forsinkelse i storskalaanvendelse **(Paulsen & Nagel, 2019)**
- Simulering af multi-modal vigepligt i kryds **(Paulsen et al., 2021)**
  - Stadig kun små forsinkelser (10 s per tur; ∼65 mio. kr. årligt i Hovedstaden)
- Et enkelt rødt lys bør give en større forsinkelse
  - Datadrevne faktiske forsinkelser nødvendige



Paulsen, M., Rasmussen, T. K., & Nielsen, O. A. (2019). "Fast or forced to follow: A speed heterogeneous approach to congested multi-lane bicycle traffic simulation". *Transportation Research Part B: Methodological* 127, pp. 72–98.
Paulsen, M. & Nagel, K. (2019). "Large-Scale Assignment of Congested Bicycle Traffic Using Speed Heterogeneous Agents". *Procedia Computer Science* 151, pp. 820–825.
Paulsen, M., Rasmussen, T. K., & Nielsen, O. A. (2021). *Including Right-Of-Way in a Joint Large-Scale Agent-Based Dynamic Traffic Assignment Model for Cars and Bicycles.* Presentation at the 8th International Symposium on Dynamic Traffic Assignment (DTA2020), Seattle, WA, US (Virtual).

Agenda

1. Baggrund
2. Metode
3. Foreløbige resultater
4. Konklusioner og perspektiver



Delprocesser



1. Find GPS-data og rens det
2. Fastsæt brugerspecifikke ønskede hastigheder
3. Kortlæg relative hastigheder
4. Identificér unikke forsinkelseslokationer
5. Beregn gnsn. turspecikke forsinkelser på lokationerne
6. Opskalér med årligt antal cyklister og monetisér

- Projektdogme: Ingen map matching!

Datakilde (Hövding – so far)

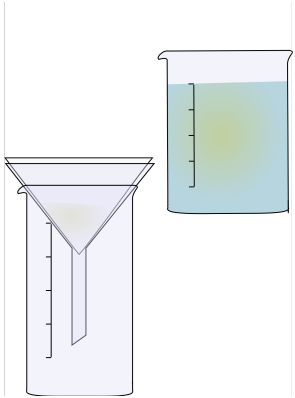
- Over 100 millioner GPS-punkter
- På tværs af mere end 10'000 brugere

Dataformat

- (x, y)-koordinater
- Tidsstempler
  - Typisk logningsfrekvens på $\sim$ 2-3s
  - Hastigheder gennem positionsforskelle
- Et device-ID



1. Datafiltrering og præprocessering



Kalman Filter

- GPS præcision generelt god
  - Afstanden mellem punkter mindre robust
- Forbedred vha. Kalman filter

- Mest ekstreme punkter fjernet forinden ud fra ændringer i ændringer i acceleration

2. Individualiserede referencehastigheder

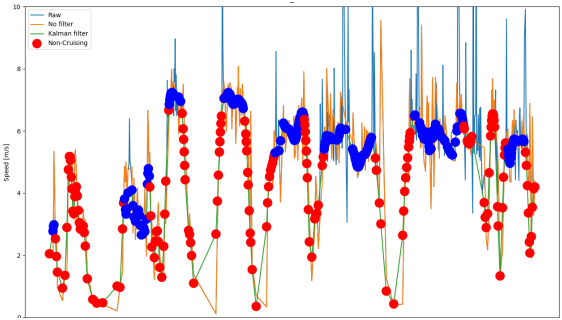
(Baseline) referencecyklisthastigheder

- Udgør halvdelen af forsinkelsesberegningerne
  - (Anden halvdel er realiseret tid)
- Antagelse: Enhver cyklist har en ønsket konstant individualiseret referencehastighed
- Findes ved analyse af mønstre på tværs af ture af samme bruger $\Rightarrow$

2. Individualiserede referencehastigheder

Identifikation af referencehastigheder

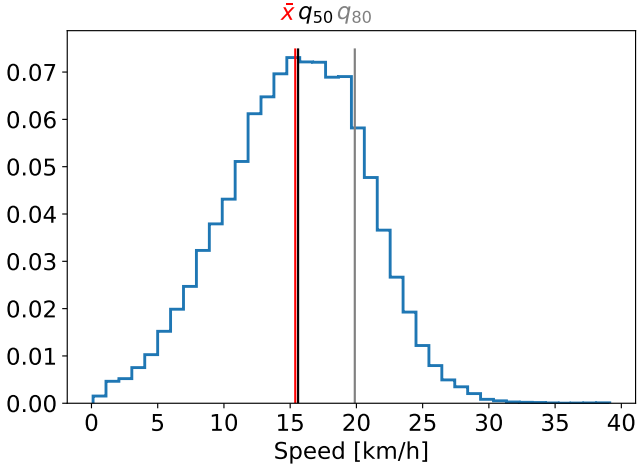
- Endte med at bruge modificeret version af **Ma & Luo (2016)**
- Vi frafiltrerer accelererende og decelererende segmenter
- + segmenter med lave hastigheder efter deceleration, der efterfølges af acceleration.



- Vi har også udforsket **Berjisian & Bigazzi (2025),** men med uforsvarlige resultater

Ma, X. & Luo, D. (2016). "Modeling cyclist acceleration process for bicycle traffic simulation using naturalistic data". *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 40, pp. 130–144.
Berjisian, E. & Bigazzi, A. (2025). "Identification and investigation of cruising speeds from cycling GPS data". *Transportation*, pp. 1–25.

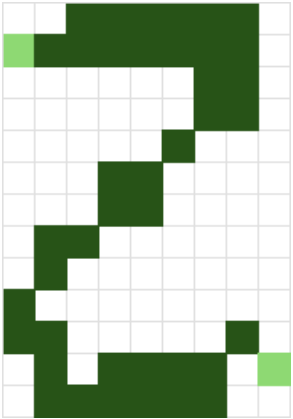
2. Individualiserede referencehastigheder



- For hver bruger opnås fordeling af potentielle referencehastigheder

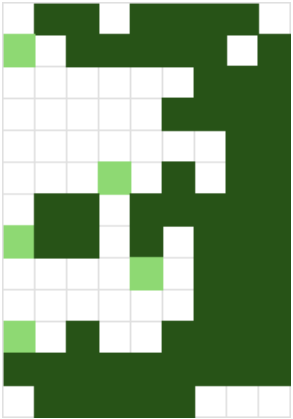
3. Rasterlag med relative hastigheder

- Plotter relativ hastighed: $\frac{\text{Hastighed}}{\text{Individuel ønsket hastighed}}$
  - Vha. justeret invers kradratafstandsvægtning
- Raster-granularitet på $2m \times 2m$ for hver kommune
- Medtager kun celler med et tilstrækkeligt antal databehæftede naboceller
  - Afhænger af datatætheden
  - I København kræves data i mindst 4 naboceller
- Kan vises med vejnetværk nedenunder
  - Netværket bruges ikke, rent GPS-datadrevet



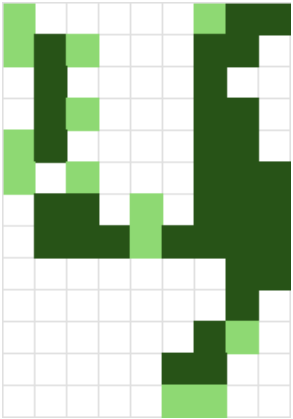
3. Rasterlag med relative hastigheder

- Plotter relativ hastighed: $\frac{\text{Hastighed}}{\text{Individuel ønsket hastighed}}$
  - Vha. justeret invers kradratafstandsvægtning
- Raster-granularitet på $2m \times 2m$ for hver kommune
- Medtager kun celler med et tilstrækkeligt antal databehæftede naboceller
  - Afhænger af datatætheden
  - I København kræves data i mindst 4 naboceller
- Kan vises med vejnetværk nedenunder
  - Netværket bruges ikke, rent GPS-datadrevet



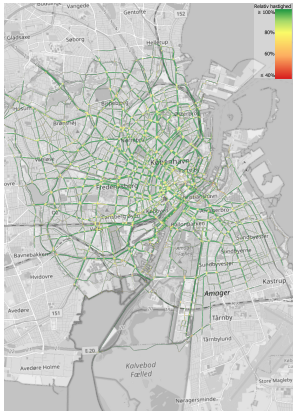
3. Rasterlag med relative hastigheder

- Plotter relativ hastighed: $\frac{\text{Hastighed}}{\text{Individuel ønsket hastighed}}$
  - Vha. justeret invers kradratafstandsvægtning
- Raster-granularitet på $2m \times 2m$ for hver kommune
- Medtager kun celler med et tilstrækkeligt antal databehæftede naboceller
  - Afhænger af datatætheden
  - I København kræves data i mindst 4 naboceller
- Kan vises med vejnetværk nedenunder
  - Netværket bruges ikke, rent GPS-datadrevet



3. Rasterlag med relative hastigheder

- Plotter relativ hastighed: $\frac{\text{Hastighed}}{\text{Individuel ønsket hastighed}}$
  - Vha. justeret invers kradratafstandsvægtning
- Raster-granularitet på $2m \times 2m$ for hver kommune
- Medtager kun celler med et tilstrækkeligt antal databehæftede naboceller
  - Afhænger af datatætheden
  - I København kræves data i mindst 4 naboceller
- Kan vises med vejnetværk nedenunder
  - Netværket bruges ikke, rent GPS-datadrevet



3. Fra GPS-data til geografisk rasterlag af gnsn. relative hastigheder

Justeret invers kvadratafstandsvægtning

$$V_{x_0y_0} = \frac{\sum_{i=1}^{N} w_i V_{\text{rel},i}}{\sum_{i=1}^{N} w_i}, \qquad w_i = \delta_i \left(\frac{1}{d_{ix_0y_0}} \right)^q, \qquad \delta_i = d((x_i, y_i), (x_{i+1}, y_{i+1}))$$

$$d_{ix_0y_0} = \begin{cases} d_{\min}, & d((x_0, y_0), (x_i, y_i)) \leq d_{\min} \\ d((x_0, y_0), (x_i, y_i)), & d_{\min} < d((x_0, y_0), (x_i, y_i)) \leq d_{\max} \\ 0, & d_{\max} < d((x_0, y_0), (x_i, y_i)) \end{cases}$$

- $q = 2, \qquad d_{\min} = 5m, \qquad d_{\max} = 50m$

3. Fra GPS-data til geografisk rasterlag af gnsn. relative hastigheder

Justeret invers kvadratafstandsvægtning

$$\boldsymbol{V}_{x_0y_0} = \frac{\sum_{i=1}^{N} w_i \boldsymbol{V}_{\text{rel},i}}{\sum_{i=1}^{N} w_i}, \qquad w_i = \delta_i \left(\frac{1}{d_{ix_0y_0}} \right)^q, \qquad \delta_i = d((x_i, y_i), (x_{i+1}, y_{i+1}))$$

$$d_{ix_0y_0} = \begin{cases} d_{\min}, & d((x_0, y_0), (x_i, y_i)) \leq d_{\min} \\ d((x_0, y_0), (x_i, y_i)), & d_{\min} < d((x_0, y_0), (x_i, y_i)) \leq d_{\max} \\ 0, & d_{\max} < d((x_0, y_0), (x_i, y_i)) \end{cases}$$

- $q = 2, \qquad d_{\min} = 5m, \qquad d_{\max} = 50m$

3. Fra GPS-data til geografisk rasterlag af gnsn. relative hastigheder

Justeret invers kvadratafstandsvægtning

$$V_{x_0y_0} = \frac{\sum_{i=1}^{N} \boldsymbol{w_i} V_{\text{rel},i}}{\sum_{i=1}^{N} \boldsymbol{w_i}}, \qquad \boldsymbol{w_i} = \delta_i \left(\frac{1}{d_{ix_0y_0}} \right)^q, \qquad \delta_i = d((x_i, y_i), (x_{i+1}, y_{i+1}))$$

$$d_{ix_0y_0} = \begin{cases} d_{\min}, & d((x_0, y_0), (x_i, y_i)) \leq d_{\min} \\ d((x_0, y_0), (x_i, y_i)), & d_{\min} < d((x_0, y_0), (x_i, y_i)) \leq d_{\max} \\ 0, & d_{\max} < d((x_0, y_0), (x_i, y_i)) \end{cases}$$

- $q = 2, \qquad d_{\min} = 5m, \qquad d_{\max} = 50m$

3. Fra GPS-data til geografisk rasterlag af gnsn. relative hastigheder

Justeret invers kvadratafstandsvægtning

$$V_{x_0 y_0} = \frac{\sum_{i=1}^{N} w_i V_{\text{rel},i}}{\sum_{i=1}^{N} w_i}, \qquad w_i = \delta_i \left(\frac{1}{d_{ix_0y_0}} \right)^{q}, \qquad \delta_i = d((x_i, y_i), (x_{i+1}, y_{i+1}))$$

$$d_{ix_0y_0} = \begin{cases} d_{\min}, & d((x_0, y_0), (x_i, y_i)) \leq d_{\min} \\ d((x_0, y_0), (x_i, y_i)), & d_{\min} < d((x_0, y_0), (x_i, y_i)) \leq d_{\max} \\ 0, & d_{\max} < d((x_0, y_0), (x_i, y_i)) \end{cases}$$

- $q = 2$, $d_{\min} = 5m$, $d_{\max} = 50m$

3. Fra GPS-data til geografisk rasterlag af gnsn. relative hastigheder

Justeret invers kvadratafstandsvægtning

$$V_{x_0y_0} = \frac{\sum_{i=1}^{N} w_i V_{\text{rel},i}}{\sum_{i=1}^{N} w_i}, \qquad w_i = \delta_i \left(\frac{1}{d_{ix_0y_0}} \right)^q, \qquad \delta_i = d((x_i, y_i), (x_{i+1}, y_{i+1}))$$

$$d_{ix_0y_0} = \begin{cases} d_{\min}, & d((x_0, y_0), (x_i, y_i)) \leq d_{\min} \\ d((x_0, y_0), (x_i, y_i)), & d_{\min} < d((x_0, y_0), (x_i, y_i)) \leq d_{\max} \\ 0, & d_{\max} < d((x_0, y_0), (x_i, y_i)) \end{cases}$$

- $q = 2, \qquad d_{\min} = 5m, \qquad d_{\max} = 50m$

3. Fra GPS-data til geografisk rasterlag af gnsn. relative hastigheder

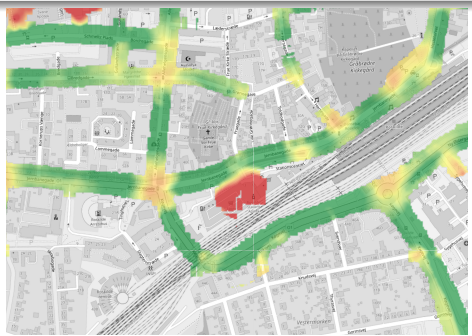
Justeret invers kvadratafstandsvægtning

$$V_{x_0y_0} = \frac{\sum_{i=1}^{N} w_i V_{\text{rel},i}}{\sum_{i=1}^{N} w_i}, \qquad w_i = \delta_i \left(\frac{1}{d_{ix_0y_0}} \right)^q, \qquad \delta_i = d((x_i, y_i), (x_{i+1}, y_{i+1}))$$

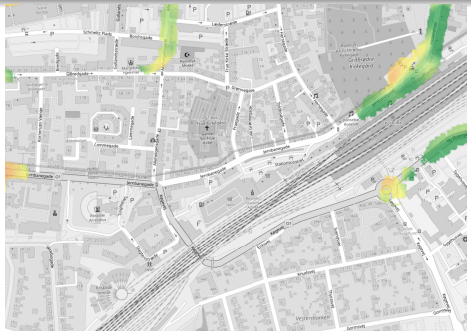
$$d_{ix_0y_0} = \begin{cases} \boldsymbol{d}_{\min}, & d((x_0, y_0), (x_i, y_i)) \leq \boldsymbol{d}_{\min} \\ d((x_0, y_0), (x_i, y_i)), & \boldsymbol{d}_{\min} < d((x_0, y_0), (x_i, y_i)) \leq \boldsymbol{d}_{\max} \\ 0, & \boldsymbol{d}_{\max} < d((x_0, y_0), (x_i, y_i)) \end{cases}$$

- $q = 2, \qquad \boldsymbol{d}_{\min} = \boldsymbol{5m}, \qquad \boldsymbol{d}_{\max} = \boldsymbol{50m}$

3. (1.) Trimning af start- og endepunkter



Roskilde St: 1st cruising + 20 punkter



Roskilde St: 1st cruising + 50 punkter

- Influerer kortlægningen betydeligt, selv ved trimning fra første/sidste cruising
- Personfølsomhed beskyttes pt ved at fjerne (for) mange punkter (40)
  - ∼40% af data mistes, da mange ture er korte

4. De K laveste lokale minima i rasterlag

- Kræver separate lokationer med tilstrækkelig afstand
- Et forsinkelses-epicenter bør være lokalt minimum
- De K laveste lokale minima kan findes hurtigt



5. Gennemsnitlig empirisk forsinkelse på K specifikke steder

Forsinkelsesberegninger

- Beregn empirisk forsinkelse af alle GPS-spor, der krydser lokation k
  - Definér buffer rundt om stedet, og herefter observeret rejsetid som

$$t_{i,k}^{\text{observed}} = t_{i,k}^{\text{exit}} - t_{i,k}^{\text{entry}}$$

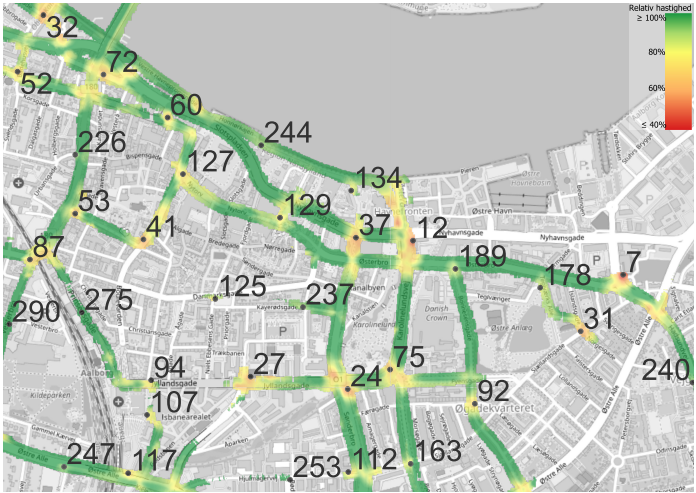
  - Definér reference-rejsetid som

$$t_{i,k}^{\text{cruising}} = \frac{d\left(P_{i,k}^{\text{entry}}, P_{i,k}^{\text{exit}}\right)}{v_{i,k}^{\text{cruising}}}$$

  - Forsinkelse beregnes da som

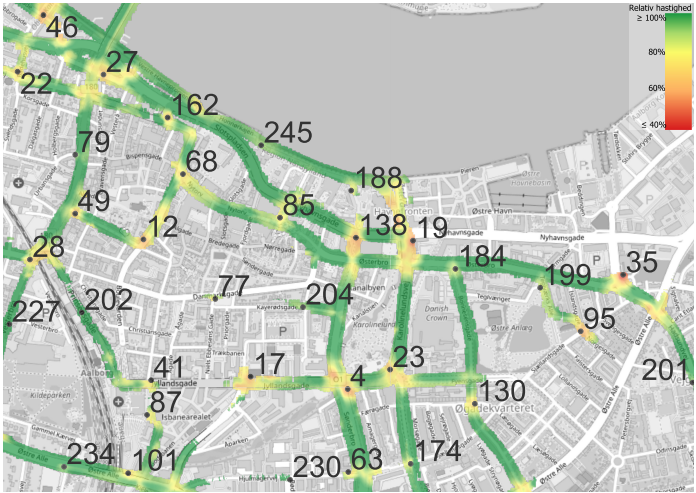
$$D_{i,k} = t_{i,k}^{\text{observed}} - t_{i,k}^{\text{cruising}}$$

5. Er det ikke bare det samme?



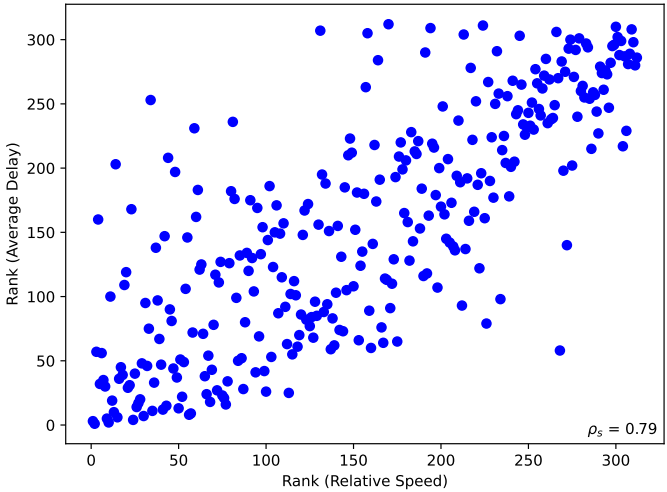
- Rangering af lokationer for relativ hastigheder vs gensn. forsinkelse ikke helt identiske
- Dog betydelig korrelation
  - 0.79 i Aalborg

5. Er det ikke bare det samme?



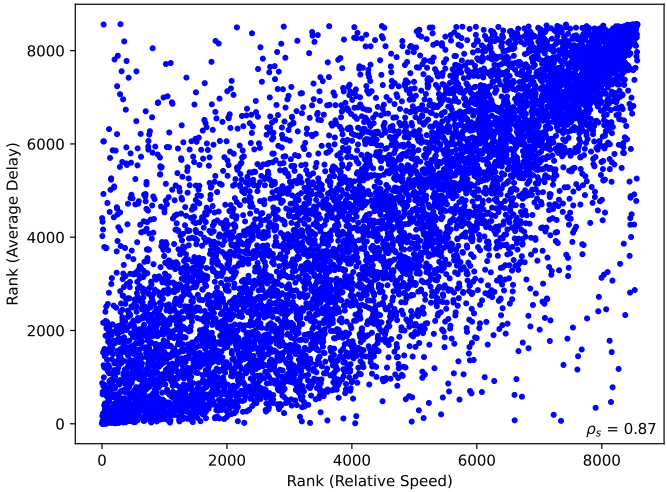
- Rangering af lokationer for relativ hastigheder vs gensn. forsinkelse ikke helt identiske
- Dog betydelig korrelation
  - 0.79 i Aalborg

5. Er det ikke bare det samme?



- Rangering af lokationer for relativ hastigheder vs gensn. forsinkelse ikke helt identiske
- Dog betydelig korrelation
  - 0.79 i Aalborg

5. Er det ikke bare det samme?



- Rangering af lokationer for relativ hastigheder vs gensn. forsinkelse ikke helt identiske
- Dog betydelig korrelation
  - 0.79 i Aalborg
  - 0.87 nationalt set

6. Monetisering

Gennemsnitlig forsinkelse vs gennemsnitlig forsinkelse, når forsinket

- Beregn gennemsnitlig tab per passage
  - Simpelt ved

$$\bar{C}_k = \begin{cases} v_d \frac{1}{|\mathcal{I}_k|} \sum_{i \in \mathcal{I}_k} D_{i,k}, & \sum_{i \in \mathcal{I}_k} D_{i,k} > 0 \\ v_t \frac{1}{|\mathcal{I}_k|} \sum_{i \in \mathcal{I}_k} D_{i,k}, & \sum_{i \in \mathcal{I}_k} D_{i,k} \leq 0 \end{cases}$$

  - Eller med hensynstagen til forskelle i enhedspriser

$$\tilde{C}_k = \frac{1}{|\mathcal{I}_k|} \sum_{i \in \mathcal{I}_k} \nu_t \min(0, D_{i,k}) + \nu_d \max(0, D_{i,k})$$

- Hvor ν_t og ν_d er tidsværdi for hhv. cyklistrejsetid og -forsinkelsestid
  - $\nu_t = 1.0$ og $\nu_d = 1.5$ DKK/min.

6. Opskalering

Bestemmelse af flows til opskalering

- Find bedste bud på faktiske cykliststrømme fx gennem output fra transportmodeller
- Bestem for hvert lokation k det tilhørende flow F_k gennem lokationen(s buffer)
- Skalér den gennemsnitlige omkostning for lokationen $\bar{C}_k$ (eller $\tilde{C}_k$) med F_k, dvs. $C_k = F_k \bar{C}_k$ eller $C_k = F_k \tilde{C}_k$
  - Udregningerne i denne præsentation er baseret på $\bar{C}_k$ — det mest konservative

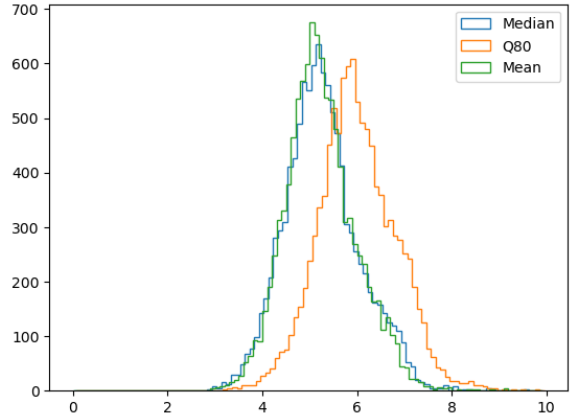
Agenda

1. Baggrund
2. Metode
3. Foreløbige resultater
4. Konklusioner og perspektiver



Individuelle referencehastigheder

- Metode for referencehastigheder giver fordeling af hastigheder
- Vi undersøger individuelle middelværdier ($\bar{x}$), medianer (q_{50}) og 80. percentiler (q_{80})



Relative hastigheder i Aalborg Midtby



Tal viser rangeringen af relative hastigheder i kommunen. 1 repræsenterer lavest hastighed.

- Dækningen fin, men ikke overvældende
  - Relateret til start/slut-klip
- Højere hastigheder i Nyhavnsgade end langs havnefronten
- Primært reduktioner i kryds

Relative hastigheder i København N



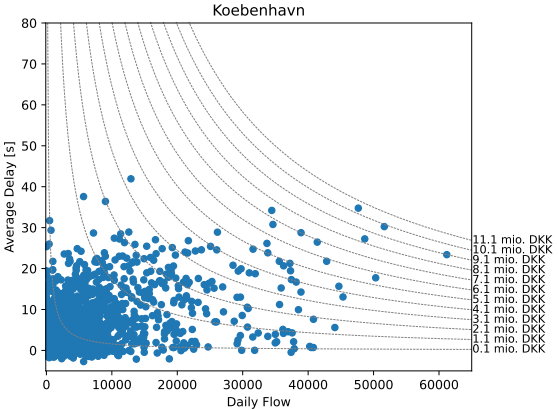
Tal viser rangeringen af totale forsinkelser kommunen. 1 repræsenterer højest total forsinkelse.

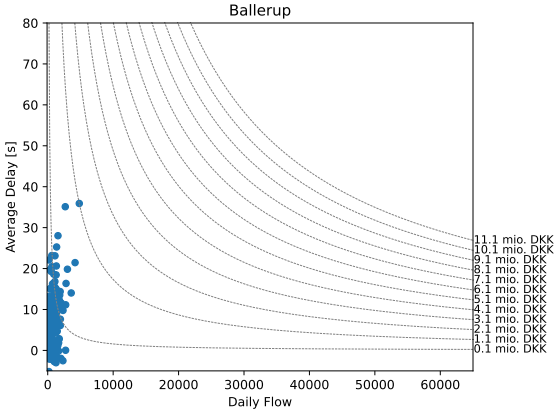
- Tæt dækning
- Primært reduktioner i kryds, men også i smågader
- Korridor med grøn bølge langs Nørrebrogade skiller sig positivt ud

Zoom-ind på specifikke lokationer

Lokation	Gnsn. forsinkelse [s] $\bar{x}$	q_{50}	q_{80}	COMPASS flow	Samlet årligt tab [mio. kr.] $\bar{x}$	q_{50}	q_{80}
Kbh-FBP	34.8	34.9	39.5	47,669	10.5	10.6	12.0
Kbh-DLB	30.2	30.4	35.4	51,641	9.9	10.0	11.6
Kbh-Dhs	41.9	42.1	46.3	12,915	3.4	3.5	3.8
Kbh-Hbg	15.5	15.8	20.2	26,936	2.7	2.7	3.5
Aal-Klv	31.1	31.3	35.5	—	?	?	?
Aar-SRg	35.4	34.8	41.3	—	?	?	?
Ode-Bgp	38.6	38.7	43.6	—	?	?	?
Næs-FøX	29.1	28.2	34.7	—	?	?	?

Isotabskurver





- Formentligt nemmere at "gøre noget ved" øvre del
- Større gevinst per sekundreduktion for højre del

Overordnede beregninger

- Det samlede tab i Hovedstadsområdet ligger på lige omkring 1 milliard om året
- Opregning til nationalt niveau kræver opskaleringen udenfor COMPASS-området

	$\bar{x}$	q_{50}	q_{80}
Samlet årlig forsinkelse [mio. timer]	10.9	11.1	15.4
Samlet årligt tab [mio. DKK]	980.7	996.8	1,390.0

Agenda

1. Baggrund
2. Metode
3. Foreløbige resultater
4. Konklusioner og perspektiver



Konklusioner



Baseret på foreløbige analyser

- Datadreven tilgang med få underliggende modelantagelser
- Tillader prioritering af indsatser på konkrete lokationer
- Forsinkelser i Hovedstaden $\sim$1 mia. kr.

Fremtidigt arbejde I

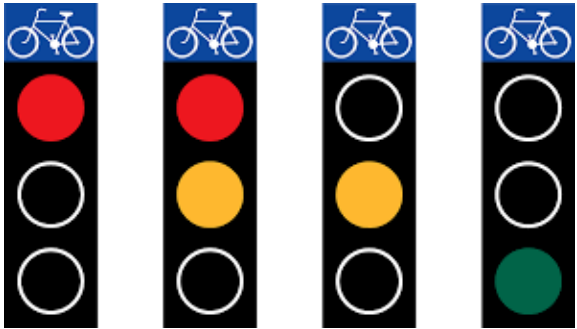
Flow-skalering udenfor Hovedstadsområdet

- Postdoc Dimitrios Argyros tilknyttet projektet udviklede destinations- og transportmiddelvalgsmodel i sin PhD, som kan bruges:
  - **Argyros, D., Fjendbo Jensen, A. & Rich, J. (2026). "Welfare-optimal public transport fares in Denmark". *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 204, p. 104790**
- Simpelt rutevalg kan give approksimative flows

Fremtidigt arbejde II

Analyse af grønne bølger

- Hvor stor er effekten af grønne bølger?
- Hvor meget varierer det på tværs af korridorer?
- Bachelorprojekt undersøger det i dette semester

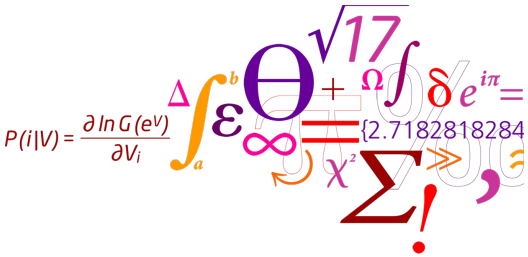


Tak for opmærksomheden!

Kortlægning og kvantificering af cyklistforsinkelser

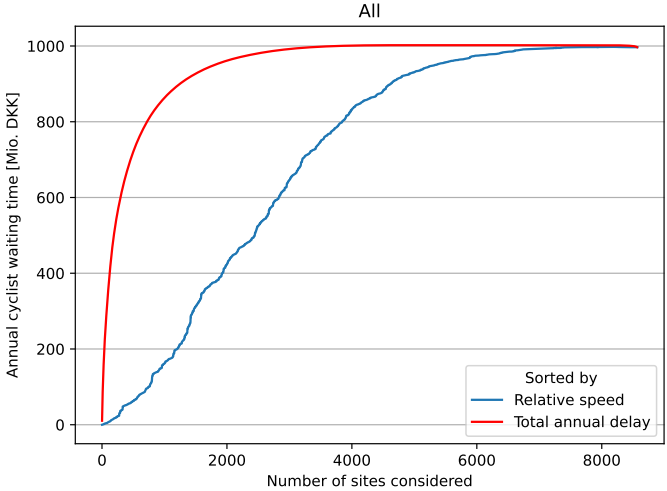
Mads Paulsen

Adjunkt (tenure track)
Institut for Teknologi, Ledelse og Økonomi
Danmarks Tekniske Universitet



26 August 2026

Relativ hastighed som indikator for medtagne lokationer



- Langt fra optimal rækkefølge (rød)
- Dog næsten konkav kurve

Fremtidigt arbejde III

Opdeling i kortlægning og kvantificering

- At cutte start/slut afture reelt set kun nødvendigt for kortlægning
- Kvantificeringen reelt godt basere sig på mere data