

Dette udvidet resumé er udgivet i det elektroniske tidsskrift

Artikler fra Trafikdage på Aalborg Universitet
(Proceedings from the Annual Transport Conference at Aalborg University)

ISSN 1603-9696

<https://journals.aau.dk/index.php/td>

Inddragelse af sundhedsgevinster i samfundsøkonomisk optimal udvidelse af supercykelstinetværket

Mads Paulsen, madsp@dtu.dk

Jeppé Rich, rich@dtu.dk

Transportdivisionen, DTU Management, Danmarks Tekniske Universitet

Abstrakt

Sundhedsgevinster er essentielle, når den samfundsøkonomiske værdi af cykelinfrastruktur evalueres. Imidlertid har disse ikke været medtaget i optimeringsmodeller designet til at planlægge udvidelser af cykelnetværk. Med udgangspunkt i en nyligt udviklet model for samfundsøkonomisk optimal udvidelse af cykelinfrastruktur (Paulsen & Rich, 2023), præsenteres her en udvidelse, der sikrer at efterspørgslen efter cykelture bestemmes endogen. Dette betyder at substitutionseffekter fra biler samt eksterne sundhedseffekter integreres i optimeringen. Metoden er afprøvet på supercykelstisnettet i Hovedstadsområdet, hvor modellen bestemmer en løsning der har en nettonutidsværdi på 16 milliarder og et samfundsøkonomisk afkast på mere end 1000%.

Introduktion

Der er betydelig evidens for at mængden af cykeltrafik påvirkes af infrastruktur, som påvist i flere studier såsom (van Goeverden, et al., 2015) og (Rich, et al., 2021). Implementering af cykelinfrastruktur ændrer således ikke kun rejsetiderne (Hallberg, et al., 2021) og rutevalget (Paulsen & Rich, 2023), men også antallet af cykelture i netværket (Hallberg, et al., 2021). Dette er et resultat af substitutionseffekter og eventuelle trafikspring.

Cost-benefit-præstationen af cykelinfrastrukturudvidelser er blevet undersøgt i (Rich, et al., 2021), der fandt at cykelinfrastruktur resulterer i et meget højt samfundsøkonomiske afkast – særligt som følge af eksterne sundhedseffekter. Disse er tidligere blevet påvist i bl.a. (Breda, et al., 2018), og er i omegnen af 7kr per kørt kilometer, når de tilsvarende omkostninger ved uheld fratrækkes ifølge de transportøkonomiske enhedspriser (Technical University of Denmark, 2022).

Det er derfor vigtigt at prioritere cykelnetværksudvidelse med henblik på at få øget antal af cykelkilometre i netværket. Dette har dog sjældent været i fokus i eksisterende studier om cykelnetværksudvidelser siden de første studier af (Smith & Haghani, 2012) og (Mesbah, et al., 2012). I stedet har det ofte været i fokus at reducere omvejskørsel (Lim, et al., 2021), maksimere kørsel på veje med få biler (Chan & Cooper, 2019) og

(Ospina, et al., 2022), samt at minimere de generaliserede omkostninger for cyklister (Lin & Yu, 2013), (Duthie & Unnikrishnan, 2014), (Mauttone, et al., 2017) og (Liu, et al., 2019).

Netop det sidste er også hovedformålet i (Paulsen & Rich, 2023), der udvikler en metode til at finde den samfundsøkonomisk optimale udvidelse af supercykelstisnetværket i Hovedstadsregionen – dog uden hensynstagen til substitutionseffekter fra andre køretøjer. Af den årsag tillader modellen i (Paulsen & Rich, 2023) heller ikke at beregne eksterne sundhedseffekter, der jo ellers som tidligere nævnt er særligt vigtige for samfundsøkonomien for cykelinfrastruktur (Rich, et al., 2021).

I dette studie udvider vi metoden fra (Paulsen & Rich, 2023) ved at inkorporere en efterspørgselsmodel i optimeringsmodellen, således at overførsel fra biler og ikke mindst eksterne sundhedseffekter kan beregnes og indgå i den udvidede beslutningsalgoritme. Ved at anvende algoritmen på udvidelser af supercykelstisnetværket i Hovedstadsområdet over en 50-årig periode, finder vi en optimal udvidelse, der fører til et nettonutidsværdi på 16 milliarder kr. Dette er 81%-417% højere end vores ad-hoc referencestrategier og har en benefit-cost-rate, der overstiger 10.

Metode

Metoden i indeværende studie, går kort fortalt ud på, at finde ud af hvilke årlige netværksudvidelser, der skal investeres i over en 50 års periode under hensynstagen til budgetrestriktioner. Metoden lader sig ikke forklare meningsfuldt i et udvidet resumé, hvorfor vi kun forsøger at omtale de mest basale elementer af optimeringsproceduren. En oversigt over modellen er vist i Figur 1.

Metoden er særdeles kompleks, idet vi ikke kun regner på effekter af udvidelser, der allerede er (antaget) effektueret på et givent tidspunkt, men også er nødsaget til at inkludere effekterne af fremtidige udvidelser, som i sagens natur er ukendte. Vi er således nødt til løbende i vores optimering også at have et bud på hvad de fremtidige udvidelser bliver, da disse kan påvirke efterspørgslen henover allerede etablerede udvidelser. Dette er den store forskel fra (Paulsen & Rich, 2023), i hvilken efterspørgslen antages konstant, og denne kryds-effekt derfor kan ignoreres.

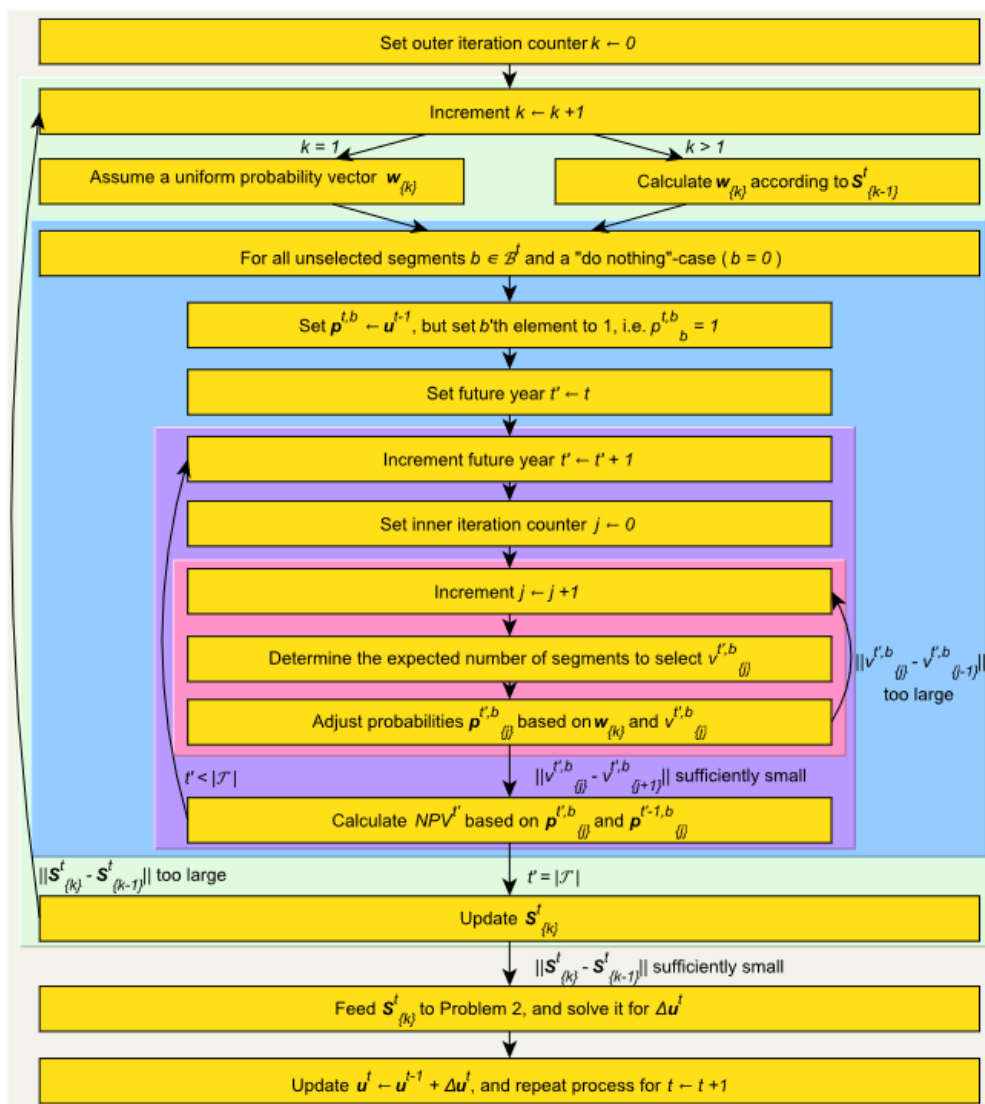
Proceduren starter stiller ingen krav til forudgående kendskab til systemet. Først foretages en vurdering af, hvad nettonutidsværdien vil blive, hvis man i tidsperiode t investerer i netværkssegment b , og at man i alle fremtidige tidsperioder udvider netværket op til budgettet med lige stor sandsynlighed for alle andre netværkssegmenter¹. Efter at have foretaget denne evaluering for alle netværkssegmenter ($b \in \mathcal{B}$) har vi nu et bud på, hvad effekten af investere i et hvilket som helst netværkssegment i tidsperiode t vil være. Disse benævnes med S_b^t for et givent netværkssegment b og tidsperiode t . Tilsvarende beregnes effekten af ikke at gøre noget i tidsperiode t , men hvor netværket stadig udvides i fremtidige perioder. Denne "do nothing"-reference benævner vi med S_0^t . Vi kan således bestemme den marginale effekt af at investere i netværkssegment b i tidsperiode t som $Z_b^t = S_b^t - S_0^t$. Segmenter, der evalueres samfundsøkonomisk profitable vil resultere i en positiv værdi af Z_b^t .

I beregningen af S_b^t og S_0^t indgår de forventede tidsgevinster (for eksisterende og nye brugere) og sundhedsgevinsterne (for eksisterende og nye brugere), samt de faktiske diskonterede anlægsomkostninger (a_b^t) og driftsomkostninger (d_b^t) samt restværdien (r_b). Ændringen i efterspørgslen er beregnet gennem en efterspørgselsmodel med parametre taget fra (Hallberg, et al., 2021), der beregner overflytning mellem biler og cykler med den til en hver tid gældende approksimerede rejsetid for cykler som input. Den approksimeret rejsetid baseres på (Paulsen & Rich, 2023).

Alle estimerne, der ligger til grund for Z_b^t er dog baseret på fremtidige udrulninger under antagelse om, at alle segmenter har lige stor sandsynlighed for at blive implementeret i fremtiden. Efter at have beregnet Z_b^t vil det imidlertid være sådan, at nogle segmenter scorer højt, mens andre scorer lavt. Vi gentager derfor

¹ Dette består i sig selv af en række fikspunktsproblemer, hvis detaljer (se Figur 1) er udeladt i dette udvide resumé.

øvelsen med at beregne alle S_b^t 'er og S_0^t , men denne gang med forventningen om at netværkssegmenter med høj værdi af S_b^t vil have større sandsynlighed for at blive valgt tidligt end dem med lav værdi af S_b^t . Da disse sandsynligheder påvirker rejsetider og efterspørgslen for ethvert OD-par i alle fremtidige perioder, kan dette føre til nye værdier af S_b^t , sammenlignet med første gang proceduren blev gennemført. Denne iterative proces fortsættes så indtil $Z_b^t = S_b^t - S_0^t$ ikke længere ændrer så nævneværdigt fra gang til gang².



Figur 1 – Overblik over optimeringsproceduren

Når dette lykkes, afgøres det hvilke segmenter, der vurderes til at være optimale at investere i, i tidsperiode t . Dette besluttes ved at løse et binært lineært matematisk program, akkurat som i (Paulsen & Rich, 2023) men med den justering, at de forventede fordele i dette tilfælde nu også indeholder effekter som følge af ændringer i efterspørgslen, herunder øgede sundhedseffekter.

Vi kan opskrive problemet matematisk ved at definere en binær vektor \mathbf{u}^t , som for hvert element \mathbf{u}_b^t indikerer om netværkssegment b er blevet valgt i tidsperiode t eller tidligere. Derudover definerer vi endnu en binær vektor $\Delta \mathbf{u}^t = \mathbf{u}^t - \mathbf{u}^{t-1}$, der indikerer hvilke segmenter, der bliver/blev valgt i tidsperiode t . Det matematiske program maksimerer den marginale gevinst ved investering i tidsperiode t , under hensynstagen til budgetrestriktioner. Hvert netværkssegment har en anlægsomkostning, og summen af disse for de valgte netværkssegmenter kan ikke overstige det kumulerede budget for tidsperiode t (B_t), fratrukket de anvendte

² I praksis hjælpes dette på vej ved at bruge "the Method of Successive Averages" (Robbins & Monro, 1951).

anlægsomkostninger til og med $t - 1$ ($\sum_{t' \leq t-1} \sum_b \Delta u_b^{t'} a_b^{t'}$) samt de anvendte driftsomkostninger til og med t ($\sum_{t' \leq t} \sum_b u_b^{t'} d_b^{t'}$).

$$\max_{u,t} \quad \sum_b \Delta u_b^t Z_b^t \quad \text{under hensynstagen til}$$

$$B_t - \sum_{t' \leq t-1} \sum_b \Delta u_b^{t'} a_b^{t'} - \sum_{t' \leq t} \sum_b u_b^{t'} d_b^{t'} \geq \sum_b \Delta u_b^t a_b^t$$

$$\Delta u_b^t \in \{0,1\}$$

Z_b^t inkluderer de forventede tidsgevinster (for eksisterende og nye brugere) og sundhedsgevinsterne (for eksisterende og nye brugere), samt de faktiske diskonterede anlægsomkostninger (a_b^t) og driftsomkostninger (d_b^t), og er derudover fratrukket den tilsvarende beregning for "do nothing"-referencen, jf. $Z_b^t = S_b^t - S_0^t$. Ovenstående problem løses sekventielt for hvert t i perioden (1, 2, ..., 50), baseret på de valgte segmenter for tidligere perioder ($\Delta u_b^{t'}$ for $t' < t$).

Resultater

Modellen er blevet testet på udvidelse af supercykelstisnetværket i Hovedstadsområdet der er opdelt i 202 netværkssegmenter som redegjort for i (Paulsen & Rich, 2023). De årlige kumulerede budgetter stiger med 50 mio. kr. årligt, og er således på 50 mio. kr. i år 1, og 2,500 mio. kr. i år 50. Alle fundne løsninger er post-evalueret med udregning af reelle, ikke-approksimerede rejsetider og efterspørgsel i hver tidsperiode.

Modellens nøgletal fra foreløbige beregninger ses i Tabel 1 under rækken *Optimering med efterspørgselseffekter*. Løsningen giver en nettonutidsværdi på over 16 milliarder kr., hvilket er 3.2 milliarder kr. højere, end når der optimeres uden hensynstagen til efterspørgselseffekter (løsningen fra (Paulsen & Rich, 2023)) og 7-12 milliarder kr. højere end vores ad-hoc referencestrategier. Helt som ventet udgør sundhedseffekterne den altoverskyggende post på 84% af de samlede gevinster.

Benefit/cost-raten for den optimale udlægning er på 10.9. De 10.9 er mellem 2-3.8 gange højere end referencestrategierne, der ligger med et afkast på omkring 3-5 kr. per investeret kr. Disse tal er i tråd med de 3.93 kr. som fundet i (Rich, et al., 2021), og viser at supercykelstinet er stærkt samfundsøkonomisk profitabelt, selv med en ringe implementeringsstrategi.

Strategi	Anlægs- omkostninger	Restværdi	Drifts- omkostninger	Tids- gevinster	Sundheds- effekter	Nettonutids- værdi	Benefit/cost- rate*
Optimering med efterspørgselseffekter	715.8	181.9	1,800.5	2,746.3	14,890.5	16,022.4	10.9
Optimering uden efterspørgselseffekter	321.7	60.4	445.9	2.197.6	11,270.0	12,760.4	19.0
Tilfældig rækkefølge	986.7	358.6	1,406.4	1,153.4	6,526.7	5,645.6	3.77
Korte segmenter først	997.2	358.6	1,387.8	1,864.1	9,001.1	8,839.6	5.36
Korte ruter først	998.9	358.6	1,386.9	1,570.3	8,166.4	7,709.5	4.80
Lange segmenter først	983.6	358.6	1,410.4	694.4	5,187.5	3,846.4	2.89
Lange ruter først	978.8	358.6	1,414.7	1,235.7	7,997.7	7,198.5	4.54

Tabel 1 – Nøgletal for forskellige metoder målt i mio. kr. *Benefit/cost-raten er enhedsløs.

Diskussion

Det er dog ikke kun de tørre samfundsøkonomiske tal, der skal vurderes, når man ser på effekterne af at inkorporere efterspørgsel. Det er ligeledes relevant at se på, hvordan det fører til andre løsninger. Indledende

resultater viser, at det umiddelbart giver større anledning til investeringer i supercykelstier længere væk fra bykernen sammenlignet med (Paulsen & Rich, 2023). Disse forskelligheder, samt hvad der præcist driver dem, eksempelvis for hvilke områder vi ser de største stigninger i antallet cyklister, vil oplagt være relevant at dykke nærmere ned i præsentationen.

Ligeledes vil det være relevant at foretage følsomhedsanalyser af efterspørgselsmodellens parametre, der påvirker graden af overflytning af cyklister. Både påvirkningen af de samfundsøkonomiske afkast, men i høj grad også hvordan det ændrer de konkrete optimale netværksudvidelser.

Resultaterne i dette papir har vidtrækkende konsekvenser for hvordan vi skal investere i transportinfrastruktur fremadrettet i vores samfund. Der har i for lang tid være en manglende fokus på cykelinfrastruktur hvilket står i skærende kontrast til den fokus som anden infrastruktur får. Dette kan retfærdiggøres hvis effekterne af cykelinfrastruktur er marginale, men selvsagt ikke hvis effekterne er i milliardstørrelsen. Den nye Limfjordsforbindelse koster i omegnen af 7 Mia. kr. og giver en nettogevinst på 8 øre per offentlig krone. Udvidelsen af supercykelstinetet giver med en minimal investering et afkast på 6.37 kr. per offentlig krone – altså næsten 80 gange højere end for Limfjordsforbindelsen. Dette bør have konsekvenser for hvordan vi planlægger fremadrettet.

Referencer

- Breda, J. et al., 2018. Promoting health-enhancing physical activity in Europe: Current state of surveillance, policy development and implementation. *Health Policy*, Volume 122(5).
- Chan, E. Y. C. & Cooper, C. H. V., 2019. Using road class as a replacement for predicted motorized traffic flow in spatial network models of cycling. *Scientific Reports*, December, Volume 9, p. 19724.
- Duthie, J. & Unnikrishnan, A., 2014. Optimization Framework for Bicycle Network Design. *Journal of Transportation Engineering*, July, Volume 140, p. 04014028.
- Hallberg, M., Rasmussen, T. K. & Rich, J., 2021. Modelling the impact of cycle superhighways and electric bicycles. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, July, Volume 149, p. 397–418.
- Lim, J., Dalmeijer, K., Guhathakurta, S. & Van Hentenryck, P., 2021. The Bicycle Network Improvement Problem: Optimization Algorithms and A Case Study in Atlanta. July.
- Lin, J.-J. & Yu, C.-J., 2013. A bikeway network design model for urban areas. *Transportation*, January, Volume 40, p. 45–68.
- Liu, H., Szeto, W. Y. & Long, J., 2019. Bike network design problem with a path-size logit-based equilibrium constraint: Formulation, global optimization, and matheuristic. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, July, Volume 127, p. 284–307.
- Mauttone, A., Mercadante, G., Rabaza, M. & Toledo, F., 2017. Bicycle network design: model and solution algorithm. *Transportation Research Procedia*, Volume 27, p. 969–976.
- Mesbah, M., Thompson, R. & Moridpour, S., 2012. Bilevel Optimization Approach to Design of Network of Bike Lanes. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research*, 2284, p. 21–28.
- Ospina, J. P., Duque, J. C., Botero-Fernández, V. & Montoya, A., 2022. The maximal covering bicycle network design problem. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, May, 159, p. 222–236.
- Paulsen, M. & Rich, J., 2023. *Societal optimal expansion of bicycle networks*, s.l.: Manuscript under revision after first round of review at Transportation Research Part B: Methodological..
- Rich, J., Jensen, A. F., Pilegaard, N. & Hallberg, M., 2021. Cost-benefit of bicycle infrastructure with e-bikes and cycle superhighways. *Case Studies on Transport Policy*, Volume 9, p. 608–615.
- Robbins, H. & Monro, S., 1951. A Stochastic Approximation Method. *The Annals of Mathematical Statistics*, 22(3), pp. 400-407.
- Smith, H. L. & Haghani, A., 2012. *A Mathematical Optimization Model for a Bicycle Network Design Considering Bicycle Level of Service*. Washington DC, s.n.
- Technical University of Denmark, 2022. *Transport Economic Unit Prices vers. 2.0*. s.l.:Center for Transport Analytics for the Danish Ministry of Transport.
- van Goeverden, K., Nielsen, T. S., Harder, H. & van Nes, R., 2015. Interventions in Bicycle Infrastructure, Lessons from Dutch and Danish Cases. *Transportation Research Procedia*, Volume 10, p. 403–412.