

Denne artikel 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>

trafikdage
NY VIDEN & NETVÆRK

COVID-19 Pandemiens Indflydelse på Passagerflowet i Københavns Metro, M1 og M2

Basthiann A. Bilde^{1,ab}, Morten L. Andersen^a, Steven Harrod^a
^a DTU, Laurupvang 15, 2750 Ballerup

^b Atkins, Arne Jacobsens Allé 17, 2300 København

¹ Korrespondanceforfatter: Basthiann.bilde@atkinsglobal.com,
Telefon nr.: +45 52 51 93 00

Abstract

Offentlig transport er en kritisk service i København, fordi mange beboere ikke ejer en bil, og under mange omstændigheder er bilkørsel ikke praktisk i byens centrum på grund af smalle veje og manglende parkering. Som svar på COVID-19 har de danske sundhedsmyndigheder fastlagt en minimumspolitik for social afstand på 1 meter i det offentlige rum. Følgende undersøgelse simulerer passagerernes flow på tre repræsentative stationer i den københavnske metro for at afgøre, om disse afstandskrav kan overholdes, samt om eventuelle fysiske ændringer bør foretages. Undersøgelsen udføres med en mikrosimulering i Bentley Legion af passagerstrømmen på tre stationer med små, mellemstore og store trafikstrømme. Simuleringen er agentbaseret, og den individuelle objektive funktion er minimering af omkostninger i henhold til gåafstand, komfort og frustration.

Resultaterne viser, at for de fleste stationer, er den fysiske infrastruktur og den forventede trafikstrøm forenelige med målene for social afstand. For nogle få af de mest efterspurgte stationer, især dem, der fungerer som intermodale knudepunkter, er der imidlertid store vanskeligheder med at opnå de ønskede sociale afstandsforanstaltninger. Især den intermodale hubstation, Nørreport, har ikke korridorer og rulletrapper, der fordeles korrekt i henhold til fodgængerstrømmen. Denne station er under jorden, og det er desværre ikke let at ændre i infrastrukturen for dette knudepunkt.

1. Introduktion

I løbet af det seneste år har verden mærket virkningerne af COVID-19-pandemien, og de offentlige transportsystemer er blevet ramt særligt hårdt. I København har den offentlige transport oplevet et stort fald i efterspørgslen efterfulgt af en gradvis stigning til en stabil efterspørgsel på omkring halvdelen af niveauet før COVID-19, pr. August 2020. Samtidig har de offentlige sundhedsmyndigheder fastsat krav til social afstand eller større åbent rum omkring hver passager. Forskningsspørgsmålet i dette dokument er, om disse mål for social afstand med rimelighed kan opfyldes inden for den eksisterende infrastruktur eller med mindre

ændringer.

Denne artikel omhandler hvordan disse parametre og restriktioner har påvirket M1/M2 metrolinjerne i København, samt kaster lys over hvad der kan gøres for at forbedre passagerstrømmen på stationer under COVID-19 retningslinjer. Den ansvarlige driftsmyndighed, Metroselskabet I/S, har leveret faktiske tælledata om passagerstrømme i en halvårsperiode, der strækker sig fra før COVID-19-udbruddet frem til genåbningen efter den første infektionsbølge. Metroselskabet kontrollerer flere passager-tællesensorer installeret på alle stationer, hvilket giver meget detaljerede fysiske tællinger på stationerne. Ud fra disse data er der udvalgt tre repræsentative stationer til en dybere analyse.

De fysiske strømme af passagerer på stationerne er blevet simuleret ved hjælp af den kommercielle software Bentley Legion. Simuleringerne med Bentley Legion giver en komplet analyse af flowet på hver station. Produktionen identificerer klart problematiske zoner og flaskehalse ved at kortlægge resultater såsom passagertæthed, sociale afstandsafbrydelser og generel pladsudnyttelse. Derudover tilbyder simuleringssmodellerne data til bestemmelse af døråbningsudnyttelse. Resultaterne giver muligvis en teoretisk tilgang til at bestemme potentielle opholdstidsreduktioner, som naturligvis giver mulighed for at opnå besparelser i rullende materiel cirkulation eller tilbyde andre muligheder for at omfordele rullende materiel.

Mange internationale undersøgelser er blevet konsulteret i forbindelse med analysen, for at bestemme specifikke parametre såsom gennemsnitlige passagerpladskrav og ganghastighedsfordelinger. Der er udvalgt tre stationer fra M1/M2-ruterne, som repræsenterer tre niveauer af stationsstørrelse, hvor stationsstørrelsen måles ved passagertal. Disse repræsentative stationer er Nørreport (stor station), Forum (mellem) og Øresund (lille).

Resultaterne viser generelt, at COVID-19 ikke skaber væsentlige passagerflowproblemer for Forum Station og Øresund Station, men der opstår en række problemer på Nørreport Station. Derudover peger resultatet på en generel forbedring af passagerstrømmen, der går fra før COVID-19 til under COVID-19. Når man ser ind i et COVID-19-scenarie med passagertal, der vender tilbage til et højere niveau, vises mange af de samme tendenser og komplikationer, som det ses før COVID-19, dog med øget effekt. Det vil være vanskeligt at foretage daglige forbedringer (små investeringer) på stationerne, fordi analysen viser et stort behov for at udvide perronpladsen og øge kapaciteten for bestemte rulletrapper. Designvalg som disse kan dog overvejes i fremtidige stationsdesign for at imødekomme fremtidige pandemier (og stigende efterspørgsel) ved at gøre infrastrukturen mere robust.

2. Passageradfærd og modeldesign

Den dominerende trafik i myldretiden er pendlere. Forskellige typer rejsende har forskellig fysisk adfærd og hastighed, og af hensyn til klarhed og konsistens af modelresultater, er al trafik formodet at være pendlere og kun myldretidsrejseperioder er modelleret. De vigtigste præstationsmål (KPI) for undersøgelsen vælges efter Pedersen og Center for Trafik og Transport (2003). Disse består af bruttopassagerstrøm, gennemsnitlig passagerstrøm og et mål for dørgennemstrømning. Definitionen af disse foranstaltninger kan sammenfattes således:

Udveksling af passagerer (bruttostrøm)

Defineret som: "Antallet af passagerer, der kommer ind og ud af toget gennem en dør"

$$F_i = E_i + A_i$$

F_i Passagerudveksling ved dør (i)

E_i Antal passagerer, der kommer ind ved døren (i)

A_i Antal passagerer, der kommer ud ved døren (i)

For hele toget på stationen (r) er det så

$$F_s = \sum F_i$$

Gennemsnitlig udveksling af passagerer:

Den gennemsnitlige passagerudvekslingstid på en station for en enkelt dør:

$$t_{tp} = \frac{t_t}{F_i}$$

t_{tp} Gennemsnitlig passagerudvekslingstid pr. passager ved en dør (sek./pass.)

t_t Gennemsnitlig døråbningstid (sek.)

F_i Passagerudveksling ved dør (i)

Døreffektivitet (gennemløb):

Døreffektivitet måler antallet af passagerer, der kommer ind/ud af toget pr. sekund. Døreffektiviteten er den gensidige af den gennemsnitlige passagerudvekslingstid.

$$L_i = \frac{1}{t_{tp}} = \frac{F_i}{t_t}$$

L_i Døreffektivitet for den valgte dør (i) [passagerer. /sekund.]

2.1 Passagerkarakteristika og parametre

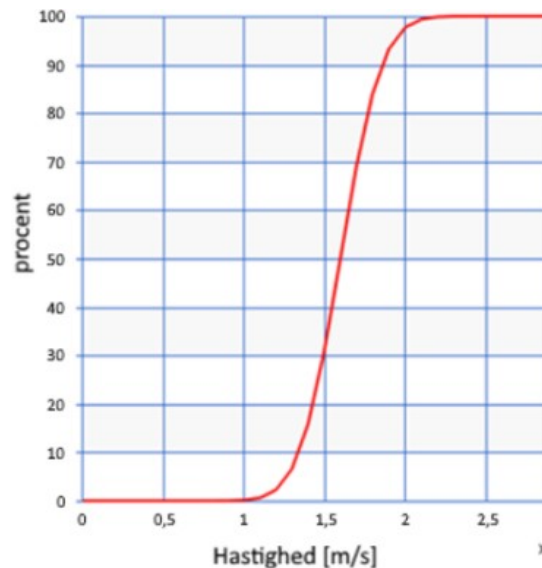
Passagerer varierer meget i deres ganghastighed, og dette påvirker naturligvis strømmen gennem stationen, mængden af passagerer på stationen (i henhold til Little's Law (Little, 1961)), og endeligt den sociale afstandsparameter for aktuel bekymring. Herrstedt (2012) konkluderer fra en litteraturundersøgelse, at den gennemsnitlige fodgængerhastighed er 60 meter i minuttet, men datasættene indeholder store prøver fra ældre og ungdomspopulationer. Finnis og Walton (2008) finder fra en gennemgang af litteratur og data indsamlet i New Zealand, at fodgængere tilpasser deres hastighed til miljøet, og at pendlere har en højere forventet hastighed.

Finnis og Walton observerer aktiviteter mellem 8:15 og 17:15 på hverdage, på 4 forskellige steder, hvilket resulterer i 1071 observationer (Tabel 1). Fra denne undersøgelse har pendlere en gennemsnitshastighed på 94,2 meter/minut med et konfidensinterval på 95 % (t-stat) på (93.305, 95.095). Dette er den hurtigste fodgænger kategori og statistisk signifikant.

Influence		<i>n</i>	Mean Speed m/min	SD m/min
Total	Flat locations	1071	88.08	14.04
Gender	Male	527	90.18	14.58
	Female	544	85.98	13.20
Age	Child (under 15 years)	12	82.70	14.53
	Young adult (15 to 30 years)	330	87.72	13.38
	Adult (30 to 55 years)	635	89.22	13.74
	Older person (over 55 years)	94	82.44	16.68
Commuting	Total	519	94.20	10.38
Children		40	71.34	13.14
Baggage	No baggage	234	85.61	15.17
	Carrying bags	659	90.79	13.16
	Talking to other person	63	78.78	14.48
Shoe type	Both	115	82.60	11.42
	Trainers	237	87.60	12.54
	Flip-flops	77	78.72	13.68
	Flat	532	91.26	12.84
Visible headphones	Heeled	121	89.22	10.44
		22	93.36	10.74
Using cell phone		9	90.80	16.04
Looking around		85	77.94	17.70

Tabel 1 Observationer af ganghastighed (Finnis og Walton, 2008).

Finnis- og Walton-undersøgelsen præsenterer betydeligt hurtigere værdier end Herrstedt-undersøgelsen. Dette favoriserer resultater med lavere passagertæthed på stationen og giver et potentielt positivt bias til resultaterne. Finnis- og Walton-statistikken vælges dog, fordi den indeholder et mere detaljeret datasæt og en mere detaljeret analyse. Simulationssoftwaren Bentley Legion gør det muligt at trække individuelle passagerhastigheder fra en normalfordeling. De værdier, der vælges i simuleringsmodellen, er et gennemsnit på 1,6 meter/sekund og en standardafvigelse på 0,2, hvilket giver en kumulativ fordeling som vist i figur 1 og svarer til pendlerværdierne i Finnis og Walton.

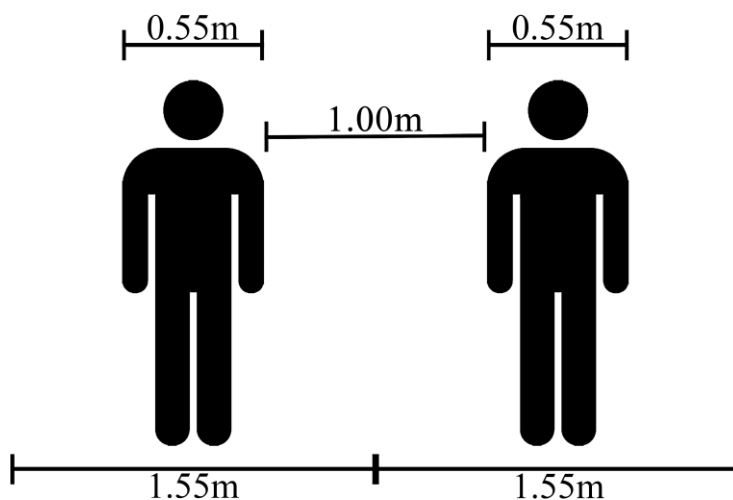


Figur 1: Kumulativ fordeling af passagerhastighed som anvendt i simuleringsmodel

Social afstand måles primært som radiusafstanden mellem folk. Den ønskede afstandsstandard fra de danske sundhedsmyndigheder under COVID-19 er i undersøgelsesperioden 2 meter. Metroselskabet har anekdotisk observeret, at denne adskillelse er næsten umuligt at garantere under hele passagerens rejse. Dette er især tydeligt ombord på togene, da det rullende materiel har en samlet bredde på 2,65 meter. Også på perronerne var social afstand ikke en del af stationernes oprindelige designparametre. Derfor forventes og opleves det, at passagererne skal acceptere en social afstand mindre end 2 meter på grund af stationens fysiske dimensioner. Dertil mindskedes kravet for social afstand i offentlig transport til 1 meter.

Bentley Legion implementerer passagerer som en solid cylinder, så det er nødvendigt at vælge en fast dimension for passagerstørrelse. Jacobs (1967) giver en ofte citeret reference for mængden af de mest tætpakkede menneskemængder, hvor hver person indtager $0,23 \text{ m}^2$, eller ca. en diameter på 0,55 meter. Sundhedstyrelsen (2020) anbefaler en minimumsadskillelse på 1 meter *mellem* personer i det offentlige rum og foretrækker 2 meter, hvor det er muligt. Det resulterende modelmål er vist i figur 2.

Passagerernes bevægelser formodes at være "rationelle". Det vil sige, ruter gennem infrastrukturen og valg af udgang formodes at følge en laveste prismodel målt i tid og kræfter. En komfortfaktor findes i modellen, der også tilskynder til brug af rulletrapper og andre bekvemmeligheder. Passagerer forventes også at vente i de markerede stående områder ved perrondøre, hvilket i forfatterens personlige erfaring er et regelmæssigt adfærdsmønster.



Figur 2: Ønsket passagertæthed ved håndhævelse af COVID-19-forholdsregler.

2.2 Infrastruktur

M1/M2-linjerne betjener 22 stationer, herunder tre underjordiske og seks dybe underjordiske. Ø-pladformer er standard overalt. Metroen er en autonom, førerløs metro, og sikkerheden sikres ved standardanvendelse af seks perrondøre til hvert spor, der matcher togdørene på placering og tæller. Stationens størrelse klassificeres efter trafikmængde. Mange af stationerne har et fælles fysisk design, men der er fysiske forskelle på nogle stationer og nogle unikke funktioner. Denne undersøgelse er udført på tre stationsklassifikationer for at få god repræsentation, hvis COVID-19's indflydelse er baseret på passagertal. De tre klassifikationer er som nævnt baseret på passagertal og er som følger:

- Stor station (mere end 20.000 passagerer/dag)
- Mellem station (mellem 7.000 og 20.000 passagerer/dag)
- Lille station (mindre end 7.000 passagerer/dag)

Klassificeringen af stationerne stammer fra Metroselskabets trafikdata fra 2018 som set i figur 3. Fra de givne grænser er fordelingen af stationsklassifikationen: 11 små stationer, 9 mellemstore stationer og 2 store stationer.



Figur 3: Gennemsnitlig ugedagspassager efterstation, M1/M2-linjerne, 2018. (Metroselskabet, 2018)

Nørreport Station er valgt til at repræsentere den store stationsklasse, fordi den er den absolut største station baseret på Metroselskabets egne passagertal. På grundlag heraf antages det, at det er den mest påvirkede station. Dette understøttes yderligere af Nørreport Stations status som en vigtigt terminal, med mange skift mellem transportformer som: bus, regionaltog, S-tog og metrosystemet. Nørreport Station markerer dermed den øvre grænse for passagerbelastningen på M1/M2-systemet. Udover Nørreport Station er der kun én af stationerne, der falder ind under den store stationsklassifikation, Kongens Nytorv Station, som har cirka halvdelen af Nørreport Stations trafik.

Forum Station er valgt til at repræsentere den mellemstore stationsklassificering, da dens fysiske design følger en fælles skabelon meget lig Nørreport Station, bortset fra manglen på en direkte transfertunnel, der forbinder til regionale- og S-tog. Det fysiske stationsdesign er desuden meget lig alle de andre dybe underjordiske stationer på M1/M2 linjerne, der primært falder ind under samme størrelseskategori som Forum Station.

Øresund Station er valgt til at repræsentere den lille stationskategori, da den er et eksemplarisk eksempel på en lille station på M1/M2-netværket, der betjener et overvejende boligkvarter og uden væsentlige forbindelser til andre transportformer. Dette er især fremtrædende, når man ser på stationsdesignet, med kun én trappe og én elevator til at servicere passagererne. Det er relevant at bemærke, at Sundby Station er den station, der har det laveste passagertal på netværket, men den har to trapper og en elevator, og det gør det til en afvigende med højere kapacitet i forhold til den faktiske efterspørgsel.

Det rullende materiel (tog) på linje M1/M2 er af et design fra Hitachi Rail Italy Driverless Metro (tidligere AnsaldoBreda Driverless Metro). Togsættene består af tre vogne, to ende og en mellemvogn med ekstra plads til bagage, cykler og forskellige klapvogne og kørestole. Togene er 39 meter lange, bestående af to ender, hver af 14 meter og en 11 meter i den midtervogn, og har en tophastighed på 90 km/t. Togene er 2,65 meter brede og bruger en standard sporbredde på 1.435 millimeter.

Alle vogne, uanset om den er en ende eller mellemvogn, har 2 døre på hver side af vognen, således at et komplet tog (3 vogne) har 6 døre til rådighed for passagerudveksling ved et stop. Før COVID-19 blev passagerkapaciteten for hvert tog beregnet som 4 passagerer/m² + siddepladser, men for COVID-19-varigheden har Metroselskabet indstillet kapaciteten til 1-2 passagerer/m² + siddepladser. Taget i betragtning at den samlede gulvplads er 58,7 m², og der er 44 pladser, var kapaciteten før COVID-19 279 passagerer/tog og 102-160 passagerer/tog under COVID-19, en reduktion på 42,6% - 73,4%.

2.3 Trafikefterspørgsel og forventede passagerstrømme

Metroselskabet gennemførte i april 2019 en privat undersøgelse over to uger, der afslørede individuel dørdnyttelse på stationerne Nørreport, Kongens Nytorv, Christianshavn, Amagerbro og Lergravsparken. Denne fordeling af dørprefereencer hævdes at være stabil i forhold til trafikniveauet. Disse data er specifikke for hver station og afspejler det fysiske design såvel som de potentielle fodgængerdestinationer. Dataene blev indsamlet mandag til torsdag, i løbet af morgenmyldretiden mellem 7:20 og 8:20.

Stationerne Forum og Øresund er ikke inkluderet i denne undersøgelse. Deres data er interpoleret. Yderligere tællinger blev udført for Forum Station af forfatterne til at bestemme retningsbestemt flow. Amagerbro Station har samme design som Forum, så dørdistributionsdataene bruges til at repræsentere proportionerne mellem dørene på Forum station.

Retning tog	Mod Lufthavnen		Mod Vanløse		Retning tog	Mod Lufthavnen		Mod Vanløse	
Station	Nørreport		Nørreport		Station	Forum		Forum	
Retning pass.	IND	UD	IND	UD	Retning pass.	IND	UD	IND	UD
dør 1	27%	33%	18%	13%	dør 1	19%	8%	16%	27%
dør 2	16%	19%	12%	11%	dør 2	9%	10%	16%	17%
dør 3	17%	15%	6%	13%	dør 3	4%	7%	18%	20%
dør 4	14%	12%	15%	17%	dør 4	20%	15%	19%	9%
dør 5	12%	8%	24%	15%	dør 5	24%	19%	13%	20%
dør 6	14%	13%	25%	30%	dør 6	25%	40%	18%	8%
ialt	100%	100%	100%	100%	ialt	100%	100%	100%	100%

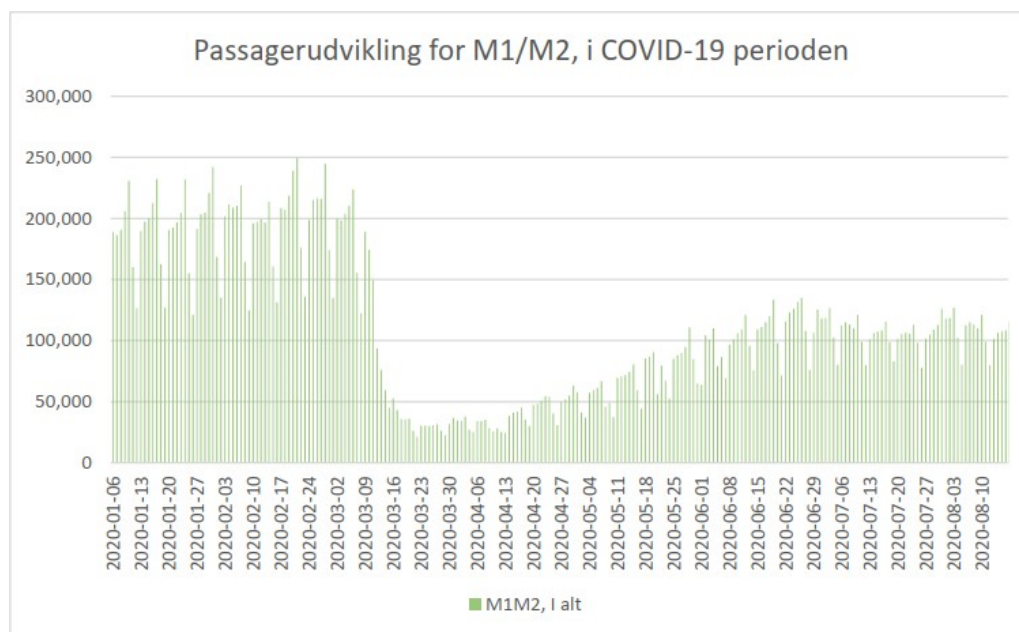
Retning tog	Mod Lufthavnen		Mod Vanløse	
Station	Øresund		Øresund	
Retning pass.	IND	UD	IND	UD
dør 1	27%	33%	18%	13%
dør 2	16%	19%	12%	11%
dør 3	17%	15%	6%	13%
dør 4	14%	12%	15%	17%
dør 5	12%	8%	24%	15%
dør 6	14%	13%	25%	30%
ialt	100%	100%	100%	100%

Tabel 2: Fordeling af foretrukne døre på Nørreport, Forum og Øresund Station, "in" og "out" refererer til ind- og udstigere.

Nørreport stations dørfordelingsdata bruges som skabelon for Øresund Station. De to stationer ligner hinanden, idet størstedelen af trafikken på Nørreport vælger en enkelt rulletrappe og elevator. Retningsfordelingen for Øresund er taget fra den nærliggende Amagerbro Station. Resultaterne for de tre forsøgsstationer fremgår af tabel 2.

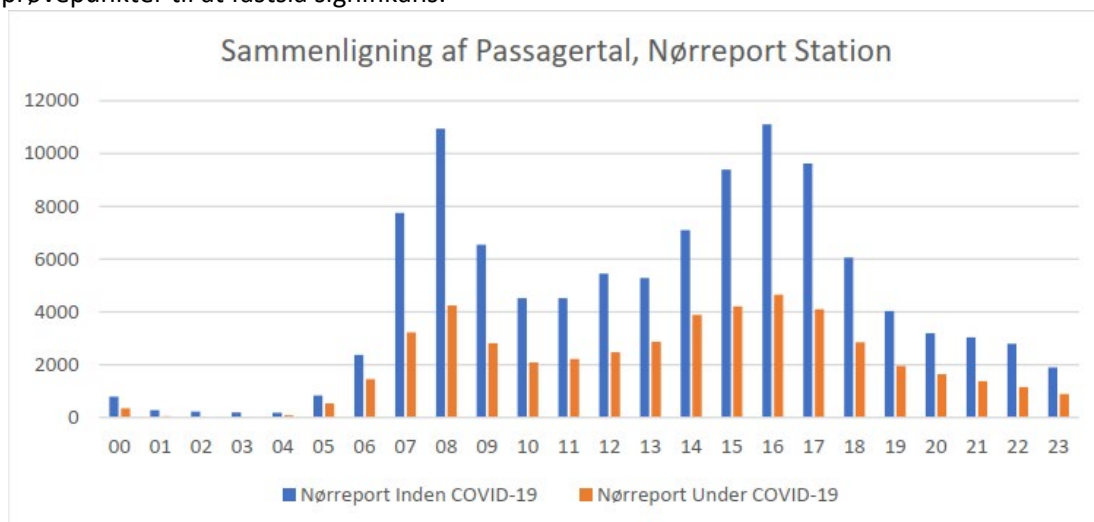
Den københavnske metro driver en frekvensbaseret service og følger derfor ikke en reel køreplan. Myldretidsfrekvensen er et afganginterval på 104 sekunder fra Nørreport. Kun halvdelen af disse tog kører til Øresund, så intervallet er derfor 208 sekunder. Disse værdier anvendes i simuleringen til at bestemme passagerstrømme, der ankommer og afgår med tog. Københavns metro har ikke ændret togfrekvensen under faldet i efterspørgslen, der skyldes COVID-19. Scenarier for passagerefterspørgsel består af et pre-COVID-19-niveau baseret på data fra 1.-15. februar 2020, et COVID-19-niveau baseret på 26.-28. maj 2020 og et hypotetisk fremtidigt scenarie, hvor trafikken vender tilbage til 75 % af niveauet før COVID-19. Formodningen i det fremtidige scenarie er, at COVID-19 ikke er løst, mens de langsigtede restriktioner på arbejde og rejser ikke er bæredygtige, og der er behov for et kompromis. Passagerefterspørgslen er udtaget fra tirsdage, onsdage og torsdage alene. Danmark gik i lockdown første gang den 11. marts 2020. Som det fremgår af Figur 4 ses passagertallet falde en lille smule før nedlukningen, efterfulgt af et brat fald. Faldet går fra mere end 200.000 daglige passagerer til omkring 25.000. Passagertallet stiger derefter langsomt hen mod sommeren 2020 som følge af lempelser af restriktioner og en mere offentlig accept af offentlig transport

efter et obligatorisk krav om mundbind. Af figur 4 fremgår det, at perioden 26.-28. maj, er et hensigtsmæssigt datagrundlag, da den falder uden for ferieperioderne

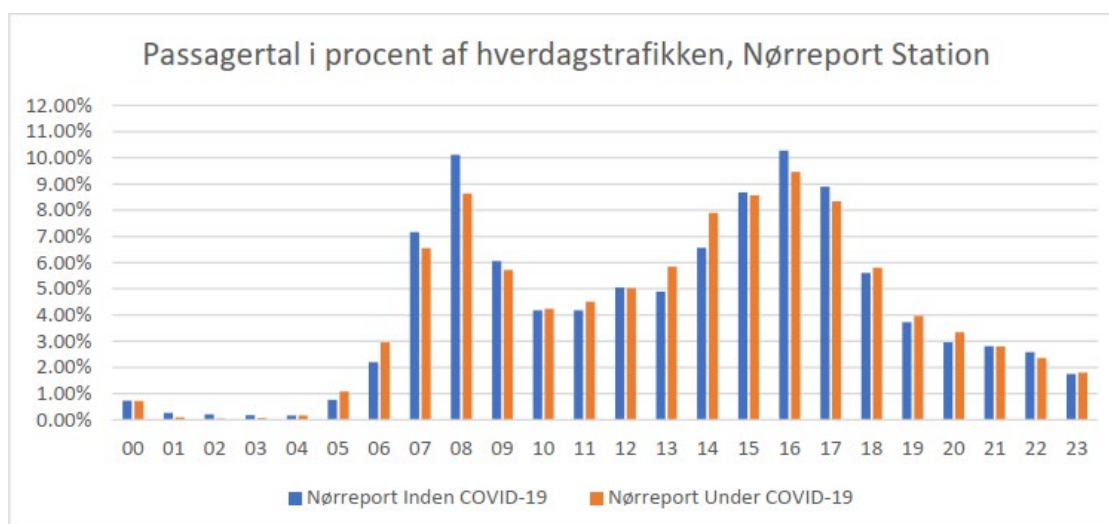


Figur 4: Samlede antal passagerer på M1/M2 i den indledende COVID-19- periode.

Fordelingen af trafikken i løbet af dagen er ikke signifikant anderledes i COVID-19-perioden. De danske sundhedsmyndigheder kom med stærke anbefalinger for at undgå myldretidsrejser og ændre arbejdstiden, men det generelle forhold mellem myldretid og resterende døgn er uændret i COVID-19-perioden. Figur 5 viser passagertallet pr. time for Nørreport station. Figur 6 viser en normalisering af timedataene i procent af de daglige totaler. Der er en lille reduktion og omfordeling af myldretidstrafikken, men datasættene har ikke nok prøvepunkter til at fastslå signifikans.



Figur 5: Passagertællinger pr. time før og efter COVID-19, Nørreport.



Figur 6: Passagertællinger pr. time, før og efter COVID-19, normaliseret efter samlede totaler, Nørreport.

3. Simulering og analyse i Bentley Legion

Bentley Legion implementerer en agentbaseret simuleringsmodel med et minimumsomkostningsmål om at beregne individuelle passagerruter. Passagerer formodes at træffe en rationel beslutning efter tids og komfortfaktorer (f.eks. rulletrappe vs. trapper). Den objektive funktion i Bentley Legion tager højde for følgende specifikke faktorer (Bentley, 2020):

- Frustration: hindres i bevægelse, bremses, f.eks. på grund af andre passagerer
- Inconvenience: i hvilket omfang er det nødvendigt at om dirigere fra den oprindelige foretrukne rute?
- Discomfort: overtrædelse af det personlige rum, tab af privatliv.
- Distance: den oplevede afstand mellem passagerens start- og slutpunkt, vægtet efter hastigheden eller det ønskelige i de enkelte bevægelsessegmenter.

Modellen beregner, baseret på disse parametre, en omkostning for hver passager og for hver mulig rute. Modellen vælger og justerer derefter den enkelte passagerrute (entitet) efter behov for at minimere omkostningerne. Parametrene for denne objektive funktion er blevet estimeret ud fra interviews med Metroselskabet og feltobservationer fra forfatterne.

Med hensyn til passagerankomst er simuleringen blevet skåret i intervaller på 5 minutter, hvor det faktiske passagerantal er blevet udnyttet. Inden for hvert 5-minutters interval følger passagerens ankomstmønster en uniform fordeling.

Simuleringen giver mulighed for løbende dataindsamling. Erfaringen i København er også, at næsten alle passagerer er i stand til at gå om bord på det første tilgængelige tog, så hver togs ankomst-afgang cyklus repræsenterer en komplet simulering iteration, der er rimeligt uafhængig. I denne analyse antages dette at være sandt, og hændelser med passagerer, der efterlades på grund af utilstrækkelig opholdstid eller trængsel, tages ikke i betragtning. En simulering på 2,5 modeltimer giver mulighed for 87 afgang i hver retning med 104 sekunders fremskridt (halvt så mange ved Øresund). Det giver en stikprøvestørrelse på $n=87$ på Nørreport og Forum, og $n=43$ ved Øresund.

Som tidligere nævnt simuleres tre scenarier eller trafikniveauer for hver station. Hver simulering nærmer sig en maksimal rejsecyklus fra 06:30 til 09:00. Scenarierne er:

- **Pre COVID-19:**
Brug af passager oplysninger fra før COVID-19-restriktionerne og virkningen af COVID-19. Passagererne kræver ikke nogen væsentlig social afstand.
- **COVID-19 Basis:**
Brug af passagerdata fra COVID-19-perioden, hvor det samlede passagertal er ca. 50% af det samlede passagertal fra før COVID-19-udbruddet. I dette scenarie kræver passagererne en øget social afstand. Den sociale afstand håndhæves ikke på tog, i togdøre og på rulletrapper eller trapper.
- **COVID-19 Fremskrevet:**
Ved hjælp af de samme data og social afstand som i COVID-19 Basis-scenariet, men passagervolumenet øges med 50%, så passagertrafikken svarer til 75% af det samlede passagertal fra før COVID-19-udbruddet.

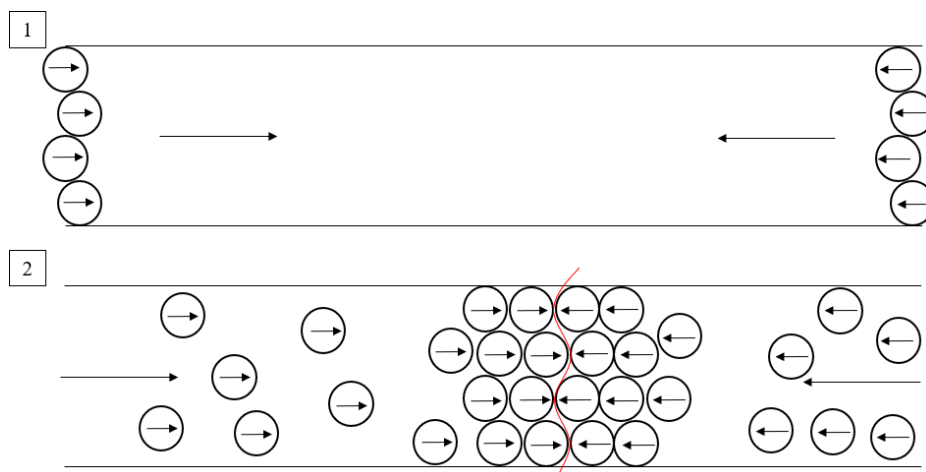
Bentley Legion tilbyder en funktion kaldet "direction modifiers", som gør det muligt at ændre parametrene for fodgængeradfærd på udvalgte steder og fysiske rum i modellen. Dette giver mulighed for at lempe social afstand inde i tog, ved togdøre osv. Social afstand håndhæves gennem Legion's "ubehag faktor", som straffer alt for tæt kontakt mellem fodgængere.

Der er et par potentielle fejlkilder i modellen. Den første er den fysiske modellering af stationspladsen. Stationsrummene er modelleret direkte fra pdf-plantegninger, som er blevet konverteret til et CAD-filformat, og der er små ændringer i stationsdimensionerne fra denne konverteringsproces. Verifikationen af en stikprøve af målinger fandt imidlertid en meget minimal afvigelse i størrelsesordenen 0,005%.

En vigtig pointe er at de danske sundhedsmyndigheder skelner mellem social afstand mellem personer ansigt til ansigt og social afstand for folk der følger i samme retning (ikke ansigt til ansigt). Dette har ført til implementering af retningsbestemte baner for fodgængertrafik i indkøbscentre og andre offentlige rum. Foranstaltningerne i denne simulering er omnidirectionel. Da Legion ikke har nogen måde at vurdere om brudene på social afstand er ansigt til ansigt, eller ansigt til ryg, er dette ikke vurderet.

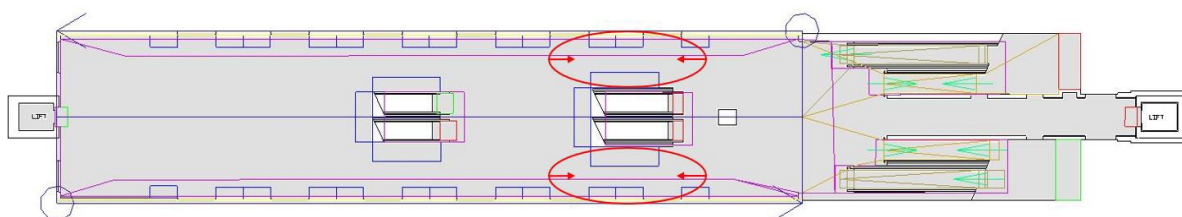
Endelig er der en væsentlig fejlkilde i figur 7, som kaldes "lockup". Det er naturligvis et velkendt fænomen, at fodgængere under stort pres kan tvinges ind i farlige forhold, hvor de komprimerer sig ind i umulige rum, hvilket fører til skade eller endda død. De mest almindelige eksempler er musikkoncerter eller sportsbegivenheder.

Selv om sådanne forhold ikke er kendt ved de trafikmængder, der simuleres for Københavns Metro, har implementeringen af social afstand i modellen den virkning, at der skabes sådanne modelresultater. I en sådan tilstand ophører simuleringsmodellen med at fungere, fordi der ikke er nogen algoritme der tvinger fodgængere til at vende retningen for at bryde blokeringen. Forekomsten af lockup er tilfældig, og løsningen i denne undersøgelse har simpelt været at køre modellen igen. I de fleste tilfælde udløser den næste tilfældige hændelsesstrøm ikke lockup.



Figur 7: Demonstration af princippet om "Lockup". Del 1: Fodgængere nærmer sig hinanden i slutningen af en flaskehals. Part 2: lige store grupper af passagerer udfylder flaskehalsen i modsatrettede retninger, blokerer al flow.

Figur 8 viser flere detaljer om flaskehalsen på Nørreport. Ca. 80% af al Nørreport metrostationstrafik er bestemt til/fra S-bane-transfertunnelen til højre i figuren. Som følge heraf skubbes passagerer i flaskehalsene, der er markeret i figur 8, i begge retninger, mens de passagerer, der venter på at gå om bord på toget, skubbes af på og afstigere. Dette resulterer ofte i en komplet låsning af simuleringen. Retningsmodifikatorer indsættes ved disse flaskehalse for at lempe social afstand i den objektive funktion, hvilket i høj grad reducerede hyppigheden af lockup.



Figur 8: Placering af særligt vanskelige flaskehalse og passagerflow på Nørreport Station.

4. Resultater og observationer

Fem "mål" bruges til at analysere overholdelsen af social afstand: gennemsnitlig tæthed (passagerer/m²), maksimal tæthed (passagerer/m²), områdeudnyttelse (anvendt tid) og 1- og 2-meter sfæreovertrædelser (kumulativ tid, hvor enhedernes sfærer krænkes af andre entiteter). Figur 9 viser et eksempel på overtrædelser af 2 meter sfæren. Skalaen er i minutter akkumuleret i løbet af modellens kørselstid. Den blå zone repræsenterer f.eks. kun en maksimal krænkelsetid på 5 minutter. Bemærk, at der i de fleste tilfælde er tale om kortvarige overtrædelser, da passagerer kun står stille, når de venter på at gå om bord på tog, og ofte vil krænke socialsfæren ved en hurtig passage.

Meget som forventet, er stationerne mest påvirket i henhold til deres trafikmængde. Øresund Station er mindst påvirket af de sociale afstandskrav. Passagertætheden er generelt lav, og overtrædelser af de sociale afstandssfærer er sjældne. Anbefalingen til Øresund Station ville være ikke at gøre noget.

Forum station, den mellem-klassificerede station, oplever pres på rulletrapper, især sfære krænkelser. Arealudnyttelsen er lav. Disse resultater var konsistente på tværs af de tre scenarier. Ingen handlinger anbefales ift. Forum station.

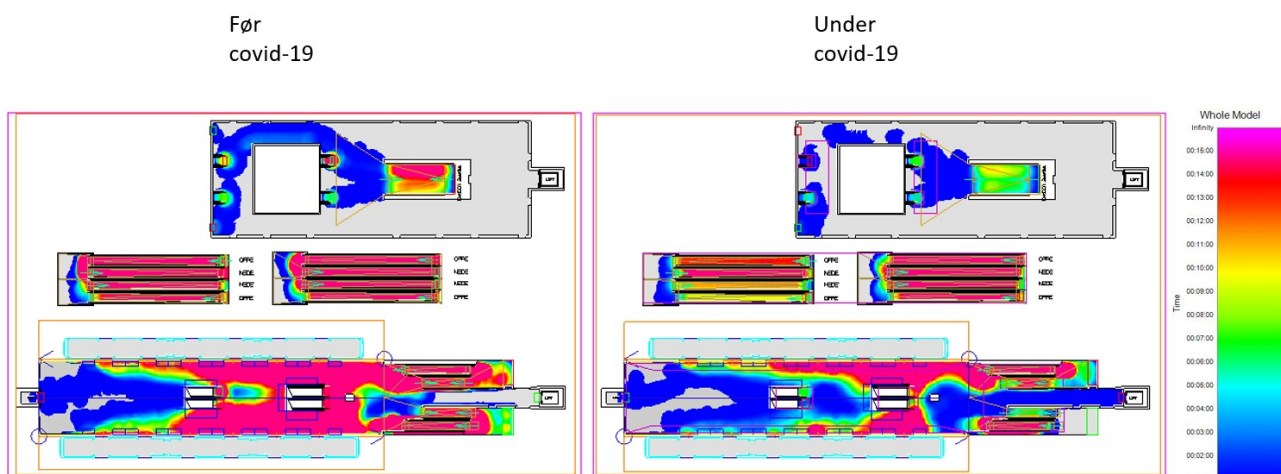
Nørreport Station, eksemplet med høj trafik, udviser betydelige overtrædelser af sfæren, som det ses i figur 9. Stationens design skal hurtigt forklares. Fra venstre er der en elevator i den yderste ende af

platformen, til gadeplan. Derefter er der ved ca. tredje perrondør et sæt rulletrapper til gadeplan. Ved sjette (sidste) perrondør er der et andet sæt rulletrapper til gadeplan. Længst til højre, er et sæt rulletrapper og trapper til S-togstationen samt regionaltogsperronerne, refereret til som "transfertunnelen". Under og bag disse rulletrapper er en elevator, der også fører til denne tunnel, samt gadeplan.

I alle scenarier er der en flaskehals mellem rulletrappen udfor dør seks, og perrondørene (også vist i figur 8) samt ved udgangen fra stationen til transfertunnelen. Disse flaskehalse kan tydeligt ses på 1- og 2- meter sfærebrud og især på 2 meter sfære ses af scenariet under COVID-19. Ansigt til ansigt-interaktioner er et kritisk problem, fordi passagererne bevæger sig i begge retninger, går om bord og stiger af tog samt skifter til og fra S- og regionaltog. Kun på rulletrapper er man sikker på ansigt til ryg positionering. På samme måde er området omkring udgangen til transfertunnelen et problemområde, da rejsende her kan mødes med ansigt til side-interaktioner, der stadig er værre end ansigt-til-ryg-interaktioner, men bedre end ansigt-til-ansigt-interaktioner.

Der kan tilbydes en række anbefalinger til Nørreport Station, af varierende kompleksitet og pris. Den første ville være større håndhævelse af retningsbestemthed i passagerstrømmen. Dette er en udfordring på grund af nødvendigheden af, at passagerstrømmen til/fra transfertunnelen går direkte forbi ventende passagerer ved dør seks. Den anden ville være at øge rulletrappernes kapacitet til transfertunnelen. Rulletrapperne i transfertunnelen har en større efterspørgsel end de kan levere. Der er to rulletrapper i begge retninger til gadeplan, men kun én rulletrappe til transfertunnelen. En ekstrem og dyr løsning ville være at fjerne det ene sæt rulletrapper til gadeplan, for at give flere baner for fodgængere på platformen. Dette er usandsynligt, fordi den oprindelige ramme for denne undersøgelse er at evaluere mindre infrastrukturændringer.

Nørreport
2m sfære



Figur 9: brud på 2-meters social sfære

En af antagelserne i modellen og valget af en enkelt simuleringskørsel med 87 afgang er, at ingen passagerer efterlades efter togafgang, og at de 87 afgang således er rimeligt uafhængige gentagelser af simuleringen. Simuleringen er i stand til at spore antallet af passagerer ombord på hver togafgang. Ud fra disse data er det muligt at angive nøjagtigt, hvilke afgang der ikke kunne imødekomme efterspørgslen- både før ankomst til stationen og efter afrejse.

Den kapacitetsgrænse, der anvendes til kapacitetsvurderingerne, er maksimalt 279 passagerer/tog Pre-COVID-19 og 160 passagerer/tog til scenarierne COVID-19 Basis og COVID-19 fremskrevet. Efter analyse af datalogfilerne fra simuleringerne oversteg kun to enkeltafgange togkapaciteten. Hertil skal det nævnes at disse forekom på Øresund Station, hvor alle passager havde fyldt den ene ende af toget, hvortil en tilløbende passager ikke kunne mase sig ind af nærmeste dør fra adgangsvejen.

5. Konklusion

Offentlig transport er en kritisk service i København, fordi mange beboere ikke ejer en bil, og under mange omstændigheder er bilkørsel ikke praktisk i byens centrum på grund af smalle veje og manglende parkering. Covid-19-pandemien udgør en udfordring og en hård begrænsning, fordi folkesundheden kræver en reduceret befolkningstæthed både på stationer og ombord på offentlig transport. De danske sundhedsmyndigheder har etableret en minimumspolitik for social afstand på mindst 1 meter i det offentlige rum med en yderligere foretrukken 2 meter social afstand. Denne undersøgelse simulerer passager fodgænger flow på tre repræsentative stationer i den københavnske metro for at afgøre, om disse mål kan nås, og hvis eventuelle fysiske ændringer bør foretages.

Undersøgelsen udføres med en mikrosimulering i Bentley Legion af passagerstrømmen på tre stationer med små, mellemstore og store trafikstrømme. Modellen simulerer morgenmyldretidens trafikstrøm over en 2,5 times interval med fodgængerparametre, der repræsenterer pendlere. Hver simuleringskørsel indeholder mindst 86 togafgange, og det komplette resultatsæt indeholder 1302 afgange fordelt over alle simuleringsscenarier. Simuleringen er agentbaseret, og den individuelle objektive funktion er minimale omkostninger i henhold til gåafstand, komfort og frustration.

Nogle af udfordringerne ved at simulere denne fodgængerstrøm omfattede modelleringsretning af flow og "lockup". De danske sundhedsmyndigheder har oplyst, at ansigt-til-ryg orientering er sikrere og at foretrække, når der er tæt fodgængertrafik, og har implementeret retningsbestemte stier i det offentlige rum og gangbroer for at fremme dette. Dataene fra simuleringsmodellen skelner ikke mellem overtrædelser af social afstand ansigt til ansigt og ansigt-til-ryg.

Lockup er en tilstand, hvor en simuleringsmodel flytter enheder til positioner, hvor det ikke er muligt at flytte simuleringen længere fremad. Stationerne indeholder områder med modsatrettede fodgængerstrømme, og når de sociale afstandsparametre håndhæves, bliver de krævede passagerers bevægelse umulig, og simuleringskørslen låses. Det er nødvendigt at lempe de sociale afstandsparametre i disse udvalgte flaskehalszoner.

Resultaterne viser, at for de fleste stationer, at den fysiske infrastruktur og den forventede trafikstrøm er forenelig med målene for social afstand. For nogle få af de mest belastede stationer, især dem, der fungerer som intermodale knudepunkter, er der imidlertid store vanskeligheder med at opnå de ønskede sociale afstandsforanstaltninger. Især den intermodale hubstation Nørreport, har ikke korridorer og rulletrapper, der fordeles korrekt i henhold til fodgængerstrømmen. Denne station er under jorden, og det er derfor ikke let at ændre denne infrastruktur.

COVID-19-pandemien er et hurtigt skiftende problem, og det er meget vanskeligt at forudsige fremtidige behov eller status. Forudsigelser foretaget for seks måneder siden er i mange tilfælde ikke blevet til virkelighed. Yderligere forskning i dette problem kunne tage fat på omdannelsen af eksisterende faste trapper til rulletrapper. Dette er en infrastrukturinvestering, men mere rimelig, fordi den ikke kræver en stigning i stationens fysiske dimensioner eller ændringer i flowmønstrene. En anden mulig løsning at evaluere ville være at synkronisere de modsatte tog på samme platform, så de ankommer og afgår forskudt af hinanden, således at mængden af passagerer på perronen reduceres. Selvfølgelig gælder denne løsning kun for en enkelt station på en jernbanelinje, da afgangstiderne på de andre stationer fastsættes i synkronisering med den valgte station.

Hvis man "tænker ud af boksen", er en anden løsning at omdirigere passagerer, for at få dem udenom og væk fra Nørreport Station. Services såsom Rejseplanen, som er bredt brugt og accepteret værktøj til at planlægge rejse med offentlig transport, kan tages i brug. Det kan være muligt at omprogrammere routingalgoritmen for at undgå Nørreport i myldretiden og på denne måde "nudge" passagertallet nedad.

Anerkendelser: Forfatterne vil gerne takke Metroselskabet I/S for deres støtte og samarbejde i udførelsen af denne forskning

Kilder/reference

1. Bentley Systems. (2019). "Legion Simulator Help." 3. marts 2021 fra: <https://docs.bentley.com/LiveContent/web/LEGION%20Simulator%20Help-v2/en/GUID-E6FFDCA7-39CF-47F8-A0F1-7DF015290C7A.html>
2. Finnis, K. K., and D. Walton. (2008). "Field Observations to Determine the Influence of Population Size, Location and Individual Factors on Pedestrian Walking Speeds." *Ergonomics* 51 (6): 827–42. <https://doi.org/10.1080/00140130701812147>.
3. Herrstedt, L. (2012). "Nordic Human Factors Guideline Ganghastigheder." Trafitec Aps, Søborg, Denmark Jacobs, H. (1967). "To count a crowd." *Columbia Journalism Review* 6, 36–40.
4. Little, John D. C. 1961. "A Proof for the Queuing Formula: $L = \lambda W$." *Operations Research* 9 (3): 383–87. <https://doi.org/10.1287/opre.9.3.383>.
5. Metroselskabet I/S. (2018). "Metroen i tal". Hentet d. 11. november 2020 fra: <https://m.dk/om-metroen/metroen-i-tal/passagertal/>
6. Pedersen, C. Kirchoff., og Center for Trafik og Transport. (2003). "Holdetid På Togstationer." CTT/ Atkins Sundhedsstyrelsen. (2020). hentet d. 3. marts 2021 fra: <https://www.sst.dk/-/media/Udgivelser/2020/Corona/Forebyggelse-af-smittespredning/Forebyggelse-af-smittespredning-publikation.ashx>