

Invloed van COVID-19 op verkeersafwikkeling

Hoogendoorn, S.P.; Daamen, W.; Yuan, Y.; Krishnakumari, P.K.

Publication date

2021

Document Version

Final published version

Published in

Tijdschrift Vervoerswetenschap

Citation (APA)

Hoogendoorn, S. P., Daamen, W., Yuan, Y., & Krishnakumari, P. K. (2021). Invloed van COVID-19 op verkeersafwikkeling. *Tijdschrift Vervoerswetenschap*, 57(1), 41-69.
<http://vervoerswetenschap.nl/category/2021/2021-1/>

Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable).
Please check the document version above.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Invloed van COVID-19 op verkeersafwikkeling

Serge Hoogendoorn

Afdeling Transport & Planning, Technische Universiteit Delft¹

Winnie Daamen

Afdeling Transport & Planning, Technische Universiteit Delft²

Yufei Yuan

Afdeling Transport & Planning, Technische Universiteit Delft³

Panchamy Krishnakumari

Afdeling Transport & Planning, Technische Universiteit Delft⁴

In dit artikel worden de effecten van COVID-19 op de (relevante onderdelen van de) *aanbodkant* van het mobiliteitssysteem beschreven. Gezien de verwachte impact ligt de focus op voetgangersstromen, fietsstromen, het gebruik van deeldiensten en openbaar vervoer voertuigen. We kijken naar het effect op de capaciteit, via gemeten of theoretisch verwachte effecten op het gedrag. We maken hierbij onderscheid tussen eenvoudige infrastructuur elementen (een voetpad, een fietspad) en netwerken of knooppunten, waarbij meer complexe interacties optreden. Dit is relevant om te kunnen inschatten welke vraag door het mobiliteitssysteem kan worden verwerkt, voordat overbelasting (congestie, vertragingen, verdrukking) ontstaat.

Het artikel start met een theoretisch raamwerk waarin we de verschillende aspecten die invloed hebben op de aanbodkant van het mobiliteitssysteem in kaart brengen. Vervolgens gaan we in op de verschillende (exit) scenario's die internationaal zijn uitgerold en waarop deze impact hebben. De effecten zijn zo goed mogelijk gekwantificeerd op grond van a) bevindingen uit de literatuur, b) theoretische analyses, en - waar mogelijk - c) analyse van beschikbare data.

De belangrijkste bevinding van dit onderzoek is dat de doorstroomcapaciteit van enkelvoudige infrastructuur elementen met 60 tot 70 procent kan afnemen, mits mensen zich strikt aan de 1,5 meter afstand houden. Indien we naar netwerken of (multimodale) knooppunten kijken, dan zien we dat deze afname groter wordt, afhankelijk van hoe effectief de ruimte in het knooppunt wordt - of kan worden - benut. We laten zien hoe lokale kenmerken zich doorvertalen naar het gehele knooppunt en we laten zien hoe de spreiding in ruimte leidt tot extra reductie van de doorstroomcapaciteit. De effecten met betrekking tot de opslagcapaciteit - hoeveel verkeersdeelnemers kunnen zich maximaal in een netwerk of knooppunt bevinden - zijn nog groter dan voor de doorstroomcapaciteit, wederom gegeven de opvolging van de 1,5 meter maatregel. Deze bevindingen laten zien dat de 1,5 meter maatregelen bij vergelijkbare vraag zou leiden tot enorme afwikkelingsproblemen.

¹ Technische Universiteit Delft, E: s.p.hoogendoorn@tudelft.nl

² Technische Universiteit Delft, E: w.daamen@tudelft.nl

³ Technische Universiteit Delft, E: y.yuan@tudelft.nl

⁴ Technische Universiteit Delft, E: p.k.krishnakumari@tudelft.nl

Uit eerste data analyses blijkt echter dat de 1,5 meter afstand vaak met voeten wordt getreden en dat veel interacties plaatsvinden op minder dan 1,5 meter afstand. Wel is onze bevinding dat in de verschillende fasen van de COVID-19 crisis de opvolging van de 1,5 meter regel verandert.

Trefwoorden: capaciteit, COVID-19, data analyses, fietsers, verkeersafwikkeling, simulatie, voetgangers,

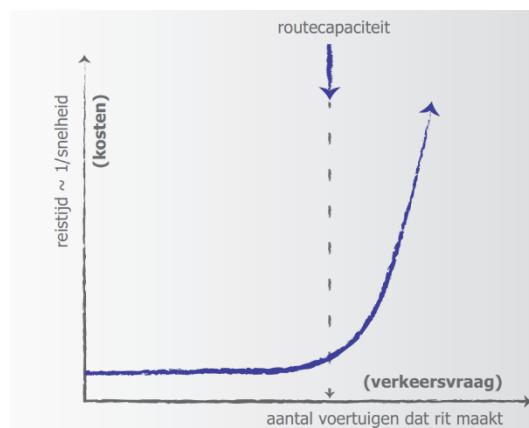
1. Inleiding

De verkeersstromen die we iedere dag zien op onze snelwegen, in onze stations, of op onze fietspaden ontstaan uit de wisselwerking tussen *vraag* en *aanbod*: reizigers willen activiteiten uitvoeren op een bepaalde locatie en moeten hiertoe reizen. Het collectief van beslissingen over alle (potentiële) reizigers leidt tot de vervoersvraag tussen herkomsten en bestemmingen. Het multimodale verkeerssysteem moet deze vraag verwerken. Als de (deel) capaciteit van het systeem niet toereikend is, dan ontstaan congestie en vertraging (bijvoorbeeld files op de autosnelweg, overvolle treinen, drukke en onveilige perrons, fietsfiles).

COVID-19 heeft een onmiskenbaar effect gehad op de *vervoersvraag*: veel mensen werken thuis, gaan niet meer naar de horeca of naar de sportvereniging, gebruiken liever niet meer het openbaar vervoer, en fietsen of wandelen vaker 'even een rondje'. Maar de angst voor besmetting in combinatie met de 1,5 meter regel leidt ook tot grote verschuivingen in de *aanbodkant van het mobiliteitssysteem*, zoals beschreven in dit artikel. Zo kunnen we een aanzienlijke afname verwachten in de capaciteit van voetgangers infrastructuur indien mensen zich aan de 1,5 meter regel houden. Voor (complexe) knooppunten verwachten we nog grotere reducties, door de interacties tussen verschillende verkeersstromen. We laten in dit paper zien hoe we deze reducties kunnen berekenen.

In dit artikel gaan we nader in op de aanbodkant van het verkeers- en vervoerssysteem. Hiertoe bespreken we eerst het voor dit doel ontwikkelde conceptuele model (hoofdstuk 2). In dit model speelt het multi-interpretabele begrip *capaciteit* een belangrijke rol, dat we kort zullen toelichten. Vervolgens bespreken we in hoeverre de in de verschillende landen uitgerolde scenario's een effect hebben op de capaciteit. Hoofdstuk 4 geeft een overzicht van de verschillende maatregelen die zijn getroffen die de aanbodkant van het mobiliteitssysteem raken. Hoofdstuk 5 beschouwt de - zeer beperkt - beschikbare literatuur, terwijl hoofdstuk 6 de belangrijkste resultaten van dit onderzoek (door het uitvoeren van theoretische analyses en analyses van data) bespreekt. In het laatste hoofdstuk formuleren we de belangrijkste bevindingen.

De analyses in dit artikel hebben grote implicaties voor de praktijk en voor het beleid, omdat ze aangeven in hoeverre de veranderingen in de verkeersvraag leiden tot problemen binnen knooppunten en netwerken. Als er meer wordt gefietst en gelopen *en* de capaciteit van de fiets- en loopinfrastructuur neemt substantieel af, dan is de kans groot dat het aantal situaties waarin de vraag het aanbod overstijgt toeneemt, met drukte (en dus moeilijker afstand kunnen houden) en vertraging tot gevolg. Figuur 1 illustreert deze relatie (voor wegverkeer, maar voor andere modaliteiten geldt een vergelijkbare relatie).



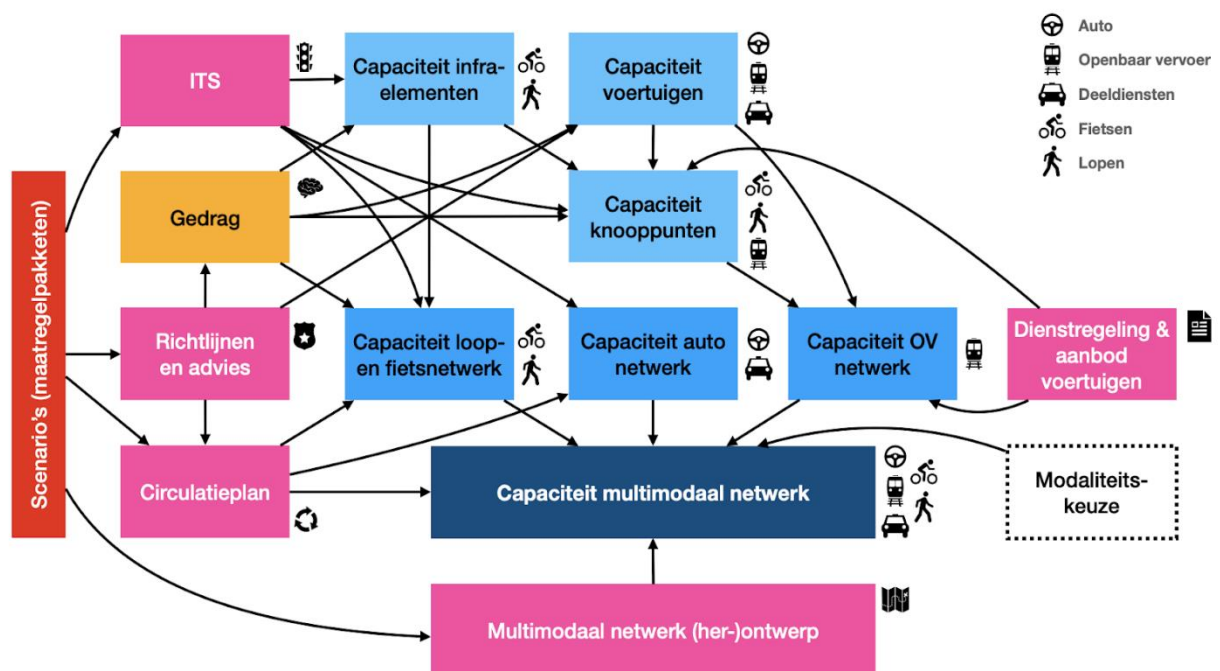
Figuur 1: Relatie tussen verkeersvraag en de reistijd en de rol van de (route-) capaciteit. Bron: (Van Lint en Marchau, 2011).

2. Conceptueel model

Figuur 2 toont het conceptuele kader voor de aanbodzijde dat is opgesteld op grond van onze kennis over het mobiliteitssysteem, waarin de capaciteit van het multimodale netwerk centraal staat. In dit conceptuele kader wordt onderscheid gemaakt tussen voetgangers, fietsers, openbaar vervoer, deeldiensten (bijvoorbeeld taxi's en Uber) en de auto.

De capaciteit (uitgedrukt in *aantallen reizigers per tijdperiode*) van eenvoudige (of liever 'enkelvoudige') infrastructuur elementen (zoals een deur, trap, of toegangspoortje) is een belangrijke factor voor het bepalen van de capaciteit van een (loop of fiets-)netwerk of een (complex) knooppunt (station, terminal). Voor met name OV netwerken maar in mindere mate ook voor autonetwerken speelt de capaciteit van een voertuig (vaak uitgedrukt in het maximaal aantal inzittenden van een voertuig) een rol, samen met zaken als de afwikkeling van deze voertuigen op het netwerk. Indien om welke reden dan ook de bezetting van het voertuig kleiner wordt, dan wordt de capaciteit van het netwerk ook kleiner (indien uitgedrukt in aantal reizigers die per tijdseenheid door het netwerk kan worden verwerkt). Het is evident dat het ontwerp van het netwerk op alle typen netwerken een effect heeft. In de figuur is echter alleen de relatie met het multimodale netwerkontwerp aangegeven, omdat juist gedurende de COVID-19 crisis verschillende interventies zijn uitgetoetst om ruimte te herverdelen onder verschillende modaliteiten.

De figuur laat de rol van scenario's zien, waarbij in dit deelproject vooral is gekeken naar hoe de interventies binnen deze scenario's de capaciteit beïnvloeden. Het gaat hier met name om de invloed van gedrag (mensen houden meer afstand, mijden drukke locaties), ITS (inzet technologie om mensen voor drukke locaties te waarschuwen), het circulatieplan (bijv. eenrichtingsverkeer), aanpassingen in de dienstregeling en overige richtlijnen en advies (bijv. maximale bezetting OV voertuigen).



Figuur 2: Conceptueel raamwerk effect COVID-19 op capaciteit van het multimodale netwerk.

3. Begrippenkader capaciteit

Het concept 'capaciteit' wordt op verschillende manieren - en vaak niet eenduidig - gebruikt. In dit artikel maken we verschil tussen:

1. *Doorstroomcapaciteit* is de maximale doorstroming of intensiteit, d.w.z. het aantal 'eenheden' dat maximaal per tijdseenheid kan worden verwerkt (binnen heersende fysieke, veiligheids- en comfortnormen). Denk hierbij aan de capaciteit van een (doorsnede van een) autoweg (ongeveer 2200 voertuigen per uur per rijstrook), de capaciteit van een deur (uitgedrukt in voetgangers per minuut of per seconde), de capaciteit van een toegangspoortje, en de capaciteit van het spoor (aantal treinen per uur). Vaak wordt capaciteit uitgedrukt in aantal voertuigen (fietsen, auto's, bussen, metro's, treinen, etc.), maar soms ook in het aantal reizigers.
2. *Opslagcapaciteit* is de maximale dichtheid d.w.z. het aantal 'eenheden' (mensen, voertuigen) die maximaal in een bepaalde faciliteit aanwezig kunnen zijn (binnen heersende fysieke, veiligheids- en comfortnormen). Denk bijvoorbeeld aan de maximale bezetting van een OV voertuig en de maximale hoeveelheid reizigers op een perron. Deze capaciteit wordt meestal uitgedrukt in het aantal reizigers per voertuig of in voertuigen of het aantal reizigers per infrastructuur element (weg, perron, gebouw).

In de verkeerskunde wordt capaciteit vaak voor een enkelvoudig infrastructuur element beschouwd. We kunnen beide concepten echter ook voor complete netwerken of knooppunten beschouwen door te kijken naar de *netwerkcapaciteit*, die zowel kan worden beschreven in termen van *doorstroming* (netwerkdorstroomcapaciteit, aantal verkeerseenheden dat per tijdseenheid wordt verwerkt in het netwerk) als in termen van *opslag* of dichtheid (netwerkopslagcapaciteit, maximaal aantal eenheden dat in het netwerk aanwezig kan zijn).

In de huidige COVID-19 crisis is het onderscheid in capaciteit uitgedrukt in voertuigen en in aantal reizigers zeer relevant, juist omdat de bezetting van veel voertuigen (zowel OV als privé) gemiddeld aanzienlijk lager zal zijn. Er geldt:

$$capaciteit_{personen} = bezetting_{gem} \cdot capaciteit_{voertuig}$$

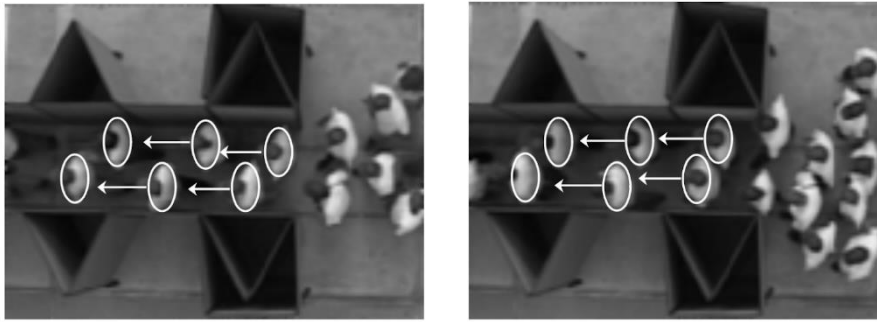
Deze relatie geldt voor beide capaciteitsbegrippen.

3.1 Doorstroomcapaciteit

De doorstroomcapaciteit van enkelvoudige infrastructuur elementen heeft een directe relatie met het gedrag van weggebruikers (in samenhang met hun voertuigen) in combinatie met het functioneren van de infrastructuur. De doorstroomcapaciteit van een deur of een (smalle) gang wordt bepaald door hoe mensen elkaar volgen (dat wil zeggen welke 'tijdsafstand' ze tot elkaar houden). Figuur 3 geeft een voorbeeld: in een nauwe gang (1 meter) vormen zich twee stroken voetgangers. Binnen deze stroken houden mensen ongeveer 1,3 sec afstand tot elkaar. De doorstroomcapaciteit van deze gang wordt dan:

$$capaciteit = 2/1,3 = 1,54 \text{ P/s}$$

Ofwel, de doorstroomcapaciteit van de gang is (ongeveer) 1,54 voetganger per seconde (per meter breedte), wat overeenkomt met 5538 voetgangers per uur (per meter breedte).



Figuur 3: Voorbeeld bepalen capaciteit gang. Bron: (Hoogendoorn en Daamen, 2005).

Door social distancing zal deze doorstroomcapaciteit veranderen: er zal zich maar 1 strook kunnen vormen en de afstand (in tijd) van 1,3 seconde kan niet veilig worden aangehouden, maar wordt 1,5 seconde bij een loopsnelheid van 1 m/s. Een eenvoudig rekensommetje laat zien dat de doorstroomcapaciteit van de gang met ongeveer 60% zal afnemen, van 1,54 P/s naar 0,67 P/s. We komen later in dit artikel nog terug op dergelijke berekeningen.

De doorstroomcapaciteit is een belangrijke grootte omdat het in hoge mate de afwikkeling in verkeersnetwerken bepaalt. Wachtrijen en files ontstaan bijvoorbeeld indien de verkeersvraag groter is dan de doorstroomcapaciteit. Eenvoudige wachtrijtheorie laat dan zien welke vertragingen we kunnen verwachten, hoeveel verkeersdeelnemers er in de wachtrij staan op een willekeurig moment, etc. Ook kunnen we bepalen in hoeverre een wijziging in de doorstroomcapaciteit leidt tot veranderingen in de verkeersafwikkelingen, en dus de vertraging die verkeersdeelnemers ervaren.

Intermezzo - Laten we kort kijken naar het effect van een dergelijke verandering in de doorstroomcapaciteit door middel van een eenvoudig voorbeeld. Stel dat er in 15 minuten 900 voetgangers bij de gang (of een vergelijkbare deur) arriveren (denk bijvoorbeeld aan de ingang van een collegegebouw van de TU Delft). We veronderstellen dat deze voetgangers homogeen over de tijd aankomen. Dit betekent dat er gedurende 15 minuten 1 voetganger per seconde bij de gang aankomt. In de pre-Covid situatie is er geen sprake van wachtrijvorming: de doorstroomcapaciteit (1.54 P/s) is immers groter dan de vraag (1 P/s). Door de afname in de doorstroomcapaciteit als gevolg van social distancing ontstaat echter wel wachtrijvorming. Het is eenvoudig uit te rekenen dat deze wachtrij na 15 minuten een maximale lengte heeft van 297 voetgangers. De laatste voetganger die in de wachtrij aansluit ondervindt een wachttijd van 7,4 minuten.

3.2 Opslagcapaciteit

De opslagcapaciteit beschrijft het maximaal aantal eenheden die zich in een voertuig, op een weg, in een publieke ruimte, etc., kan begeven, binnen vigerende veiligheidsnormen. Voor een autoweg wordt dit bepaald door de minimale afstanden tussen de auto's (voertuiglengte + netto afstand bij stilstand). Voor voertuigen geldt dat de opslagcapaciteit wordt bepaald door de maximale bezetting van een voertuig (bijv. het aantal zit- en staanplaatsen). Voor een publieke ruimte wordt het maximaal aantal mensen bepaald door de minimale ruimte die mensen innemen zodat wordt voldaan aan de heersende normen op het gebied van comfort en veiligheid. In westerse landen wordt uitgegaan van (ongeveer) 2 m² per persoon.

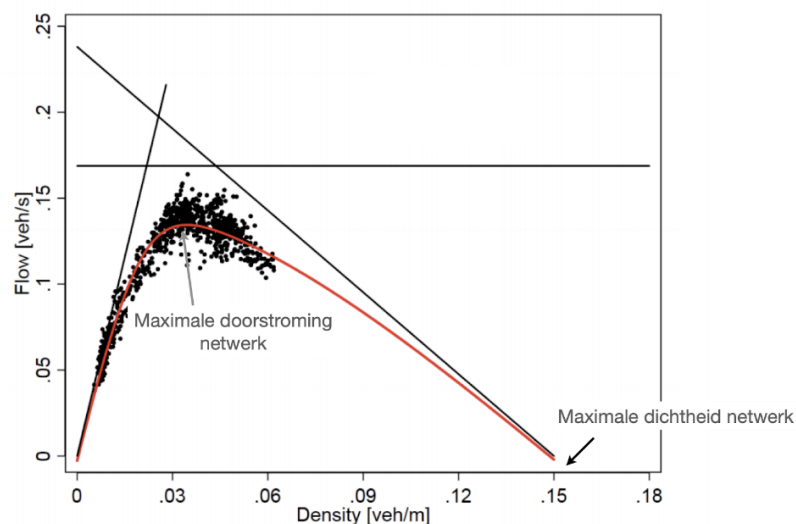
3.3 Capaciteit van een netwerk

In bovenstaande hebben we kort gekeken naar het capaciteitsbegrip voor *enkelvoudige infrastructuur elementen*, bijvoorbeeld een enkele gang of straat. Ofschoon er verschillende definities in omloop zijn, is het veelal relatief eenvoudig om de capaciteit te duiden en te bepalen. De capaciteit van een netwerk – of van een (complex) knooppunt dat vanuit verkeerskundig perspectief ook een netwerk is – is echter minder eenvoudig te bepalen. Hier zijn diverse redenen voor. Ten eerste het gebruik van de verschillende begrippen: ook hier geldt dat er sprake is van een logisch onderscheid tussen netwerkdoorstroomcapaciteit (maximale stabiele doorstroming van het netwerk of het knooppunt) en netwerkopslagcapaciteit (het maximaal aantal eenheden dat in een netwerk aanwezig kan zijn).

In tegenstelling tot de capaciteit van enkelvoudige infrastructuur elementen, is de *capaciteit van een netwerk of een knooppunt* afhankelijk van het complex samenspel tussen verkeersafwikkelingsprocessen in het netwerk of knooppunt. Aan de ene kant zijn de actieve knelpunten in het netwerk / knooppunt bepalend voor de doorstroming van het hele netwerk. Aan de andere kant zien we dat terugslag van wachtrijen, bijvoorbeeld over kruispunten of kruisingsvlakken heen, voor beperkingen in de doorstroming zorgen.

Het zogenaamde *Network Fundamenteel Diagram* (NFD) beschrijft de relatie tussen het aantal 'eenheden' in het netwerk (ook wel de *accumulatie* genoemd) en de *prestatie* of de *uitstroom* van het netwerk. Deze relatie is vastgesteld voor zowel autoverkeer (Geroliminis en Daganzo, 2008) als voor voetgangersstromen (Hoogendoorn et al., 2017).

Figuur 4 toont een voorbeeld van het NFD, waarbij de intensiteit (in aantal verkeerseenheden per tijdseenheid) is uitgezet tegen het aantal verkeerseenheden in het netwerk of knooppunt. Het diagram heeft een aantal zinvolle kenmerken voor de analyse van het functioneren van een netwerk of een knooppunt: zo is de *netwerkdoorstroomcapaciteit* duidelijk uit het diagram af te lezen (in de figuur: 'maximale doorstroming netwerk'). Ook zien we de *netwerkopslagcapaciteit* terug (de maximale dichtheid) in de figuur.



Figuur 4: Voorbeeld NFD in relatie tot netwerkkenmerken (maximale doorstroming, maximale dichtheid); uit (Ambuhl et al., 2018).

In het vervolg van dit artikel zullen we verder ingaan op het gebruik van het NFD voor de analyse van een knooppunt.

4. Overzicht scenario's

Vanaf de uitbraak van COVID-19 zijn diverse maatregelen getroffen om de verdere verspreiding van het virus tegen te gaan. Deze maatregelen hebben soms direct betrekking op het mobiliteitssysteem (en de capaciteit daarvan) en soms een indirect effect. In dit hoofdstuk geven we een beknopt (en niet uitputtend!) overzicht van de verschillende scenario's die de afgelopen periode zijn uitgerold.

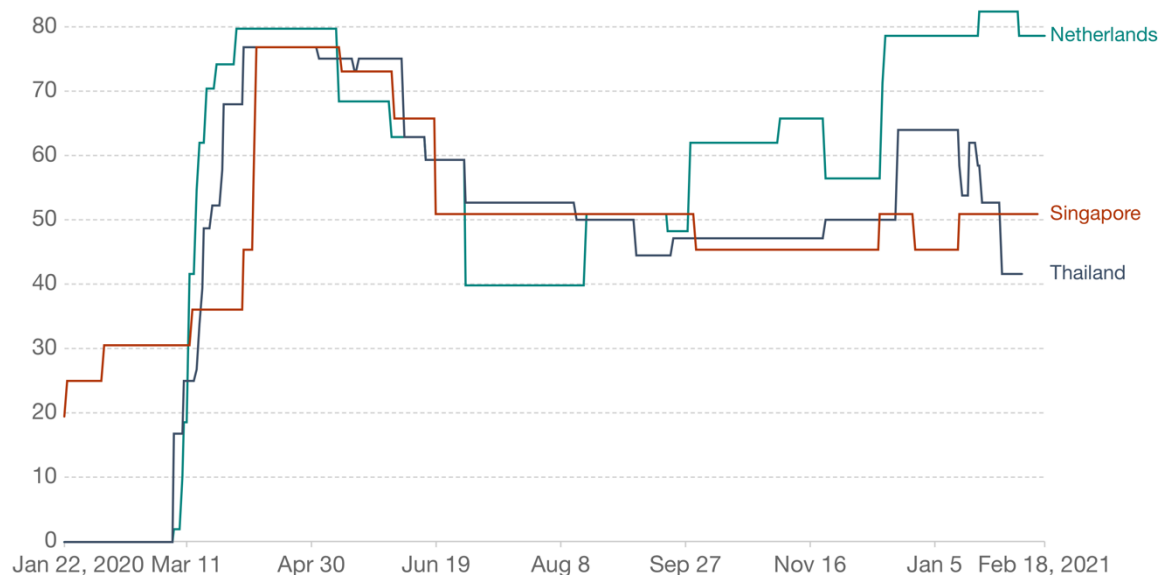
Onderstaande tabel toont scenario's gegeven, met een focus op de scenario's in Nederland en de succesvolle scenario's in het buitenland. In de tabel is onderscheid gemaakt tussen social distancing maatregelen, restricties van bewegingsmogelijkheden en maatregelen die te maken hebben met de gezondheid.

Tabel 1: Overzicht scenario's in Nederland en succesvolle scenario's in het buitenland.

CATEGORIE	MAATREGELEN	SCENARIO'S					
		Nederland				Thailand/Singapore	
		Volledige lockdown (1e golf: maa-apr)	Gedeeltelijke lockdown (eind sep/ okt -nu)	Versoepeling (apr - juni)	Heropenen (juni - begin sep)	Stabiele versoepeling	Stabiele meest strikte lockdown
Social distancing maatregelen	Scholen sluiten	<i>Sluiting vereist (alle niveaus)</i>	<i>Sluiting aanbevolen</i>	<i>Sluiting vereist (sommige niveaus)</i>	<i>Geen maatregelen</i>	<i>Geen maatregelen/ Sluiting aanbevolen</i>	<i>Sluiting vereist (alle niveaus)</i>
	Thuiswerken	<i>Sluiting vereist voor alle niet essentiële sectoren</i>	<i>Sluiting vereist voor sommige sectoren</i>	<i>Sluiting vereist voor sommige sectoren</i>	<i>Sluiting vereist voor sommige sectoren</i>	<i>Sluiting aanbevolen</i>	<i>Sluiting vereist voor alle niet-essentiële sectoren</i>
	Annuleren openbare evenementen	<i>Vereist</i>	<i>Vereist</i>	<i>Vereist</i>	<i>Aanbevolen</i>	<i>Aanbevolen/Vereist</i>	<i>Vereist</i>
	Beperkingen voor bijeenkomsten	<i>Beperkingen voor bijeenkomsten van 11-100 personen</i>	<i>Beperkingen voor bijeenkomsten van minder dan 10 personen</i>	<i>Beperkingen voor bijeenkomsten van 11-100 personen</i>	<i>Beperkingen voor bijeenkomsten van 101-1000 personen</i>	<i>Beperkingen voor bijeenkomsten van 101-1000 personen / minder dan 10</i>	<i>Beperkingen voor bijeenkomsten van 11-100 personen / minder dan 10</i>
	Sluiten openbaar vervoer	<i>Aanbevolen</i>	<i>Geen maatregelen</i>	<i>Aanbevolen/Geen maatregelen</i>	<i>Geen maatregelen</i>	<i>Geen maatregelen</i>	<i>Aanbevolen</i>
	Thuis blijven	<i>Vereist met uitzonderingen</i>	<i>Thuisblijven aanbevolen</i>	<i>Thuisblijven aanbevolen</i>	<i>Thuisblijven aanbevolen</i>	<i>Thuisblijven aanbevolen</i>	<i>Thuisblijven aanbevolen /Vereist met uitzonderingen</i>

Bewegings- beperkingen	Beperking voor binnenlandse verplaatsingen	<i>Aanbevolen</i>	<i>Aanbevolen</i>	<i>Aanbevolen</i>	<i>Geen maatregelen</i>	<i>Aanbevolen/Geen maatregelen</i>	<i>Vereist</i>
	Internationale reizen	<i>Verbod</i>	<i>Verbod</i>	<i>Verbod</i>	<i>Verbod</i>	<i>Verbod</i>	<i>Sluiting van grenzen/Quarantaine</i>
Gezondheids maatregelen	Test beleid	<i>Personen met symptomen die in aanmerking komen</i>	<i>Iedereen met symptomen</i>	<i>Personen met symptomen die in aanmerking komen /Iedereen met symptomen</i>	<i>Iedereen met symptomen</i>	<i>Iedereen met symptomen</i>	<i>Personen met symptomen die in aanmerking komen /Iedereen met symptomen</i>
	Contact onderzoek	<i>Beperkt</i>	<i>Uitgebreid</i>	<i>Beperkt/Uitgebreid</i>	<i>Uitgebreid</i>	<i>Uitgebreid</i>	<i>Uitgebreid</i>
	Gelaats- bedekking	<i>Geen beleid</i>	<i>Vereist in sommige openbare ruimtes Verplicht in indoor openbare ruimte (vanaf 1 december)</i>	<i>Geen beleid/Vereist in sommige openbare ruimtes</i>	<i>Vereist in sommige openbare ruimtes</i>	<i>Vereist in alle ruimtes</i>	<i>Vereist in alle openbare ruimtes/Altijd vereist buitenshuis</i>

We hebben vier scenario's in Nederland geïdentificeerd op basis van de *striktheidsindex* in Figuur 5. Deze index is een samengestelde indicator op basis van negen responsindicatoren, waaronder sluitingen van scholen, werkplekken en reisverboden, geschaald op een waarde van 0 tot 100 (100 = strengst). Als het beleid op regionaal niveau verschilt, wordt de index weergegeven als het responsniveau van de strengste regio. Nederland heeft vier scenario's toegepast, variërend van een volledige lockdown tijdens de eerste golf met een *striktheidsindex* van ongeveer 80 (van de 100) tot het weer openstellen van het land (index van ongeveer 40 van de 100). Onder de internationale succesverhalen vallen Thailand en Singapore op met hun strenge maar effectieve maatregelen om de verspreiding in te dammen. De belangrijkste maatregelen die in overeenstemming zijn met deze succesvolle landen lijken de verplichte gezichtsbedekking op alle openbare plaatsen en het uitgebreid traceren van contacten.

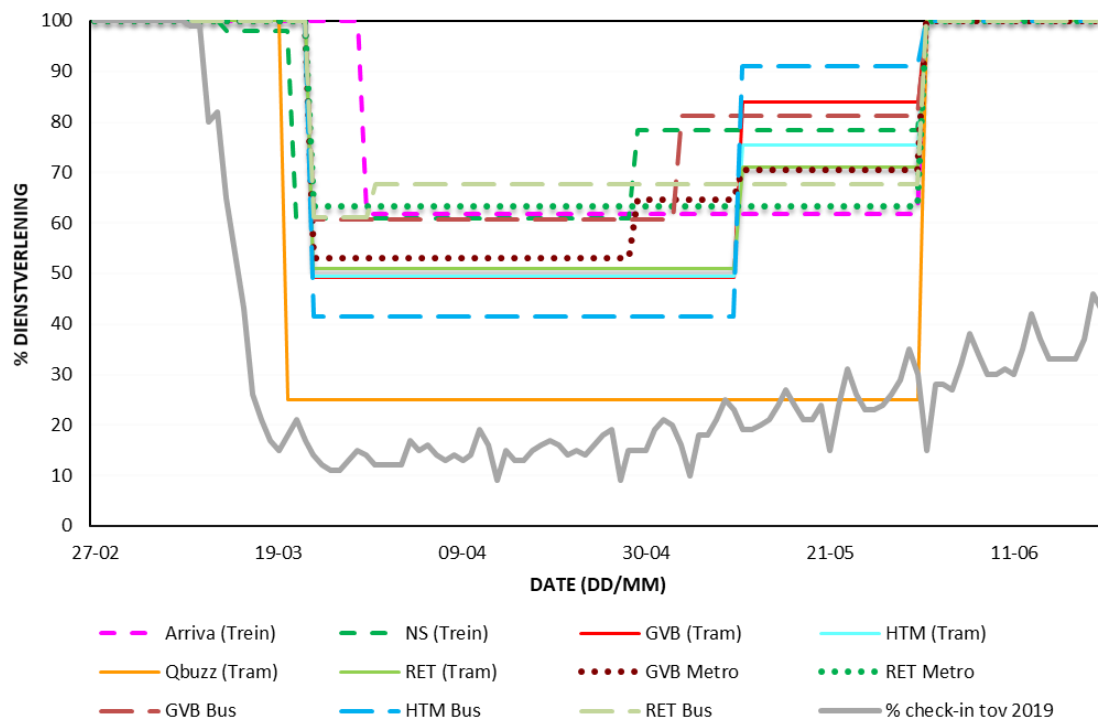


Figuur 5: Striktheidsindex (Government stringency index) voor maatregelen in Nederland, Singapore en Thailand (tot 18 februari 2021). Bron: <https://ourworldindata.org/grapher/Covid-stringency-index>.

In het vervolg kijken we niet alleen kort naar de specifieke maatregelen per modaliteit, maar ook naar maatregelen die meerdere modaliteiten betreffen.

4.1 Openbaar vervoer

Volgens de regelgeving van de overheid moeten reizigers buitenshuis minstens 1,5 m afstand houden. Als reactie op deze regel moeten aanbieders van openbaar vervoer diensten het aantal beschikbare zitplaatsen in alle operationele voertuigen (d.w.z. treinen, trams, metro's en bussen) met de helft verminderen. Dit impliceert een vermindering van de (theoretische) exploitatiecapaciteit met 50%. Over het algemeen hebben de aanbieders van openbaar vervoer diensten ook hun dienstverlening verminderd door de drastische daling van het aantal passagiers. Volgens de analyse van Van der Horst (2020) is de NS-treindienst/capaciteit in de diepste lockdown met 60% gedaald ten opzichte van de pre-corona-tijd. Ook voor de andere modaliteiten van het OV daalde de capaciteit. Voor de tram (RET, GVB, HTM) daalde de capaciteit met 50%. De metro capaciteit voor GVB en RET daalde met respectievelijk 50% en 60%. De HTM-buscapaciteit daalde met 40% en de GVB- en RET-bus capaciteit daalde met ongeveer 60%.



Figuur 6: Dienstverlening van verschillende OV bedrijven in Nederland in vergelijking tot 2019 in het eerste half jaar van 2020.

Figuur 6 toont het relatieve aantal check-ins ten opzichte van de referentiedagen van 2019 (basisgegevens), die zijn aangepast aan de weekenden en vakanties van 2020 (Translink, 2020). Merk op dat de check-in gegevens beginnen vanaf 9 maart en niet vanaf 27 februari. Zoals te zien is in de grafiek bleef het relatieve aantal diensten van alle bedrijven en alle vervoersmodaliteiten boven het relatieve aantal (de witte curve) totale aantal passagiers voor alle fasen. Dit geeft aan dat er altijd voldoende service was voor de gemiddelde vraag, maar het is niet zeker of dit het geval is voor elke vervoersmodaliteit en elk bedrijf afzonderlijk, aangezien de passagiersvraag per bedrijf en vervoersmodaliteit niet bekend zijn. Binnen het OV systeem zijn hier en daar ook innovaties en ITS uitgetoetst. Deze zullen we hier niet uitgebreid bespreken.

4.2 Voetgangers en fietsers

Voor fietsers en voetgangers geldt in algemene zin de 1,5 m regel. Zoals we eerder hebben gezien bij het rekenvoorbeeld voor voetgangers heeft deze regel een aanzienlijk effect op de (doorstroom-)capaciteit, mits we veronderstellen dat voetgangers en fietsers zich daadwerkelijk aan de 1,5 meter afstand houden. Dit geldt voor fiets- en looppaden, maar ook voor publieke ruimten (fietsenstallingen, stations, etc.). In hoofdstuk 6 gaan we hier uitgebreid op in.

Op dezelfde manier zou volgens de overheidsregelgeving over sociale afstand (1,5 m-regel) de "opslagcapaciteit" van evenementen/locaties worden verminderd. Tijdens de lockdown (inclusief de gedeeltelijke lockdown) periode was de maximale groepsgrootte voor openluchtevenementen en -locaties 40% van de normale capaciteit. De groepsgrootte binnenshuis (in besloten ruimten: bv. bioscoop, restaurant (indien open)) was beperkt tot 30 personen, waar mensen zitten. Groepen waren beperkt tot maximaal vier personen (indien niet uit hetzelfde huishouden) - bijvoorbeeld maximaal vier vrienden aan een tafel in een restaurant.

4.3 Particuliere voertuigen

Volgens de overheidsmaatregelen in Nederland waren er geen significante beperkingen voor particuliere voertuigen. Tijdens de volledige lockdown-periode van maart tot mei moesten mensen die in een auto of ander privévoertuig reisden, tot hetzelfde huishouden behoren. Vanaf juli 2020 werd mensen die in een auto of ander privévoertuig reizen geadviseerd om een niet-medisch gezichtsmasker te dragen als er 2 of meer mensen in het voertuig zitten die tot verschillende huishoudens behoren.

4.4 Multimodaal netwerk ontwerp

Een van de maatregelen die in verschillende landen is ingevoerd (of uitgeprobeerd) is het herverdelen van de infrastructuur. Voorbeelden hiervan zijn het openstellen van fietspaden voor voetgangers, terwijl fietsers op de rijbaan moeten rijden (proef in Amsterdam) of het toewijzen van stedelijke wegen aan fietsen (bijvoorbeeld in Milaan). In sommige steden wordt de pandemie gezien als een 'game changer', waarbij meer ruimte wordt geboden aan voetgangers en (vooral) fietsers. Dit leidt ook tot het besef dat dit op termijn alleen kan indien faciliteiten lopend of met de fiets goed bereikbaar zijn (15-minute city).

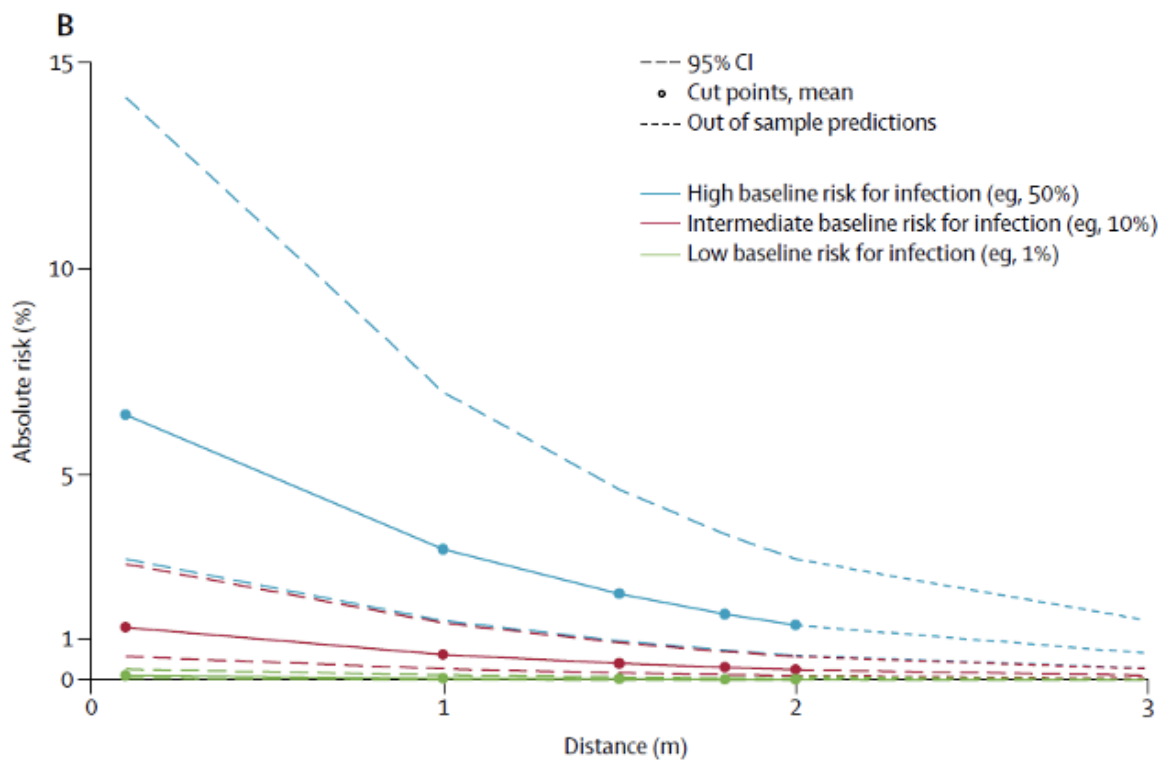
5. Literatuuroverzicht effecten COVID-19 maatregelen op gedrag, capaciteit, besmetting en besmettingsrisico's

In dit hoofdstuk beschouwen we kort de literatuur die is verschenen over de impact van COVID-19 en de verschillende maatregelen op de doorstroming. Een snelle scan maakt duidelijk dat er nog weinig literatuur voorhanden is en dat de meeste literatuur 'grijs' is. De literatuur beperkt zich tot loop- en fietsstromen, openbaar vervoer en deeldiensten.

5.1 Studies loop- en fietsstromen

Van Schaik et al. (2020) ontwikkelen een nieuw kader voor capaciteitsbepaling dat kan worden gebruikt om de capaciteit van openbare (voetgangers)ruimten te berekenen, dat is gebaseerd op de huidige stand van zaken met betrekking tot de operationele bewegingsdynamiek van voetgangers. Dit raamwerk bepaalt met name de capaciteit van COVID-19 aan de hand van drie onafhankelijke kernprestatie-indicatoren (d.w.z. de doorstroming, de dichtheid en het aantal interacties) en bevat de meest recente kennis over het loop- en groepsgedrag van voetgangers.

Het werk dat wordt uitgevoerd in het Fieldlab (<https://fieldlabevenementen.nl/>) onderzoekt de besmettingsrisico's bij evenementen. Het idee is om eerst de gebeurtenissen en maatregelen te vertalen naar gegeneraliseerde inputs (inclusief contactduur, contactafstand, en maatregelen, zoals binnen/buitenomgevingen, niveau van ventilatie, gezichtsmaskerbeleid), en vervolgens de relatie tussen deze inputs en de verontreinigingsrisico's af te leiden via wiskundige modellen. Een en ander wordt gebaseerd op de relatie tussen contactduur, afstand, etc.; zie Figuur 7.



Figuur 7: Besmettingsrisico als functie van afstand. Bron: (Chu et al., 2020).

Kretz (2020) modelleerde hoe een infectie die zich verspreidt door een groep voetgangers met behulp van een aantal van de nieuwe functies uit Viswalk 21. Hij speelde met input volumes en loopgedrag om het effect van social-distancing te beschrijven. Hij concludeert dat de parameters van het besmettingsproces - in werkelijkheid leiden korte interacties zelden tot een besmetting en is het onduidelijk vanaf welk moment na besmetting iemand besmettelijk is - duidelijk onrealistisch zijn, maar dat de resultaten wel inzicht geven in het besmettingsproces. Social distancing heeft een duidelijk effect op de snelheid waarmee het virus zich verspreidt, maar er lijken nog steeds besmettingen plaats te vinden.

Naast de al verschenen literatuur zijn meerdere projecten nog volop bezig. Een tweetal voorbeelden zijn het SamenSlimOpen project (Duives et al., in review) en het MOCOLODO project. In het SamenSlimOpen project worden wiskundige modellen ontwikkeld om de complexe interacties in kaart te brengen die de basis vormen voor het overdragen van het COVID-19 virus in kleine binnenruimtes, zoals restaurants. Daartoe wordt een interactieve modelomgeving ontwikkeld, waarin verkeerskundige voetgangersmodellen worden gekoppeld met transmissiemodellen. Deze modelomgeving wordt beschikbaar gesteld voor exploitanten van kleine binnenruimtes om te testen of de inrichting van de ruimte in combinatie met social distancing maatregelen afdoende zijn tegen de overdracht van het virus. Het MOCOLODO project (Mobility during and after corona lock-down: sustainability, safety, inclusion) onderzoekt veranderingen in tijd-, ruimtelijk- en mobiliteitsgedrag voor en tijdens de COVID-19 periode en probeert deze gedragsveranderingen te vertalen naar strategieën om de lockdown te beëindigen. Voor de lange termijn zal het inzicht in deze gedragsveranderingen leiden tot beleidsaanbevelingen om doelstellingen rond duurzaamheid, energietransitie, leefbaarheid en bereikbaarheid te behalen. De basis van het onderzoek wordt gevormd door empirische data, die deels al beschikbaar is en deels wordt verzameld in het kader van het UMO project (Urban Mobility Observatory, Daamen et al., 2020).

5.2 Openbaar vervoer

Er bestaat verschillende grijze literatuur die de impact van COVID-19 op het openbaar vervoer onderzoekt. In Shelat (2020) is gekeken naar de voorkeur van de treingebruiker en de perceptie van drukte onder verschillende infectiecijfers. Uit het keuze-experiment dat in mei onder representatieve treingebruikers in Nederland is uitgevoerd, bleek dat meer dan de helft van de gebruikers de trein waarschijnlijk niet zal gebruiken, zelfs niet als slechts een derde van de zitplaatsen wordt ingenomen. In Nederland is samen met de NS een grootschaliger onderzoek gedaan naar de impact van COVID-19 op het reisgedrag van treinreizigers op de korte en lange termijn. Verschillende aspecten zoals het reisgedrag, de ervaringen, de houding en de verwachtingen van de reizigers werden in het onderzoek tijdens de eerste golf gevraagd en hetzelfde onderzoek werd in verschillende stadia van COVID-19 naar hetzelfde panel gestuurd om de verandering in de voorkeuren van de gebruikers te monitoren.

Jenelius (2020) gebruikte de gegevens van de smartcard om de impact van Covid op OV-rijders te onderzoeken. Ze analyseerden hoe het reisgedrag veranderde per verschillende modi (bus, metro, trein en tram) en per type ticket (volledige kosten, kortingskaarten, kaarten voor enkele reizen, maand- of jaarkaarten, etc.). Ook al is het OV gebruik vanaf maart weer toegenomen, ten opzichte van 2019, toch is het gebruik nog steeds met meer dan 50% gedaald. Bovendien stappen over van minder flexibele kaartsoorten zoals de maand- of jaarkaarten naar betalen per reis, omdat ze minder reizen. Krishnakumari (2020) heeft de gegevens van de smartcard van het metronetwerk gebruikt om contactgrafieken te maken, die vervolgens kunnen worden gebruikt voor het traceren van contacten binnen het OV-netwerk en om te modelleren hoe COVID-19 zich via het netwerk verspreidt. Het bleek dat met dezelfde vraag als pre-corona, slechts 3 geïnfecteerde passagiers binnen 20 dagen tot een besmetting van 55% van de passagiersbevolking kunnen leiden. Dit onderstreept het belang van de maatregelen die zowel door de overheid als door de openbaarvervoersautoriteiten zijn genomen om de drukte op de stations en in de treinen te verminderen.

5.3 Deeldiensten

Kucharski (2020) onderzocht hoe COVID-19 zich verspreidt in ride-sharing netwerken (netwerken van deeldiensten). Het bleek dat het verspreidingsproces binnen het netwerk beperkt is, zowel in termen van een enkele infector die waarschijnlijk niet de hele ride-sharing populatie zal infecteren, als in termen van een initieel deel van de geïnfecteerde reizigers, dat zich waarschijnlijk niet door het netwerk zal verspreiden.

5.4 Conclusies

Bovenstaande literatuurstudie geeft aan dat er weliswaar een aantal studies zijn uitgevoerd die de gevolgen van Covid in kaart brengen voor de verschillende modaliteiten, maar er is zeker geen volledig beeld van deze gevolgen voor de verkeersafwikkeling. In het vervolg van dit artikel breiden we de beschikbare kennis omtrent Covid uit, waarbij we specifiek kijken naar de gevolgen van één maatregel (de 1,5 meter maatregel) voor voetgangers- en fietsstromen.

6. Nieuwe inzichten door data- en theoretische analyses

In dit hoofdstuk laten we de verwachte effecten zien van de 1,5 meter maatregel op de kenmerken van de afwikkeling. We doen dit door zowel eenvoudige theoretische analyses uit te voeren en door naar empirische data te kijken.

6.1 Theoretische aanpak en simulaties

Het voorbeeld in §3.1 heeft al laten zien hoe we op grond van eenvoudige aannames over het gedrag van voetgangers (en fietsers) de capaciteit kunnen uitrekenen. In deze sectie gaan we hier dieper op in.

Ruimtegebruik en het fundamenteel diagram

De capaciteit van eenvoudige loop- en fietsinfrastructuurelementen wordt bepaald door de **minimale afstand** die verkeersdeelnemers tot elkaar bewaren in longitudinale en laterale zin en de **(kritische) snelheid** waarmee men zich dan beweegt. Deze afstanden die verkeersdeelnemers tot elkaar aanhouden bepalen het gemiddelde oppervlak die een voetganger of fietser nodig heeft. Dit oppervlak A is een functie van de snelheid $A = A(v)$. Hierbij geldt: hoe hoger de snelheid, hoe meer ruimte er nodig is. Met andere woorden: $dA/dv \geq 0$. Voor de dichtheid geldt dat deze gelijk is aan de inverse van de gemiddelde afstand, dus $k = 1/A(v)$. Hieruit kunnen we ook opmaken dat de dichtheid een functie is van de snelheid (de zogenaamde fundamentele relatie), i.e. $\rho = k(v)$. Andersom kunnen we zeggen dat de snelheid een functie is van de dichtheid, dus $v = v(\rho)$. Daarbij kunnen we opmerken dat voor de intensiteit geldt dat $q = \rho \cdot v = k \cdot v(\rho) = q(\rho)$. Deze relatie is van belang omdat het laat zien dat de maximale intensiteit ($q = c$) wordt bereikt bij een zekere dichtheid (de zogenaamde kritische dichtheid) en snelheid (de kritische snelheid).

Het fundamenteel diagram (FD) kan worden gebruikt om de effecten van social-distancing op de capaciteit te bepalen. We kunnen bijvoorbeeld een lineair verband veronderstellen tussen het oppervlak A en de snelheid v , m.a.w.:

$$A(v) = A_0 + \beta \cdot v$$

Hierin is $\beta > 0$ een grootte die we op grond van data analyses kunnen vaststellen; A_0 beschrijft het minimale oppervlak van een voetganger (dat is het oppervlak van een voetganger wanneer deze stilstaat, dus een snelheid heeft van 0). Deze aanname leidt tot een driehoekig fundamenteel diagram (ook wel het *Daganzo fundamenteel diagram* genoemd).

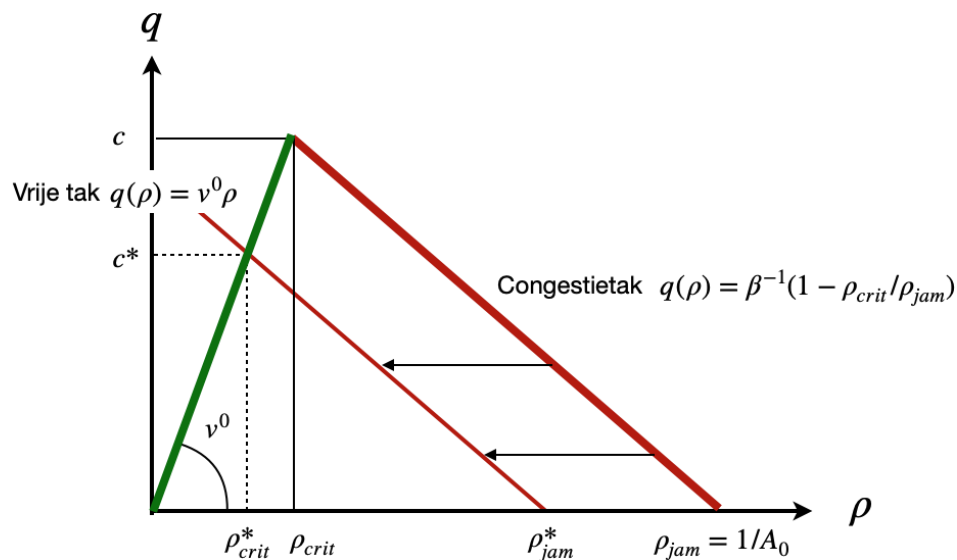
Social-distancing heeft invloed op dit oppervlak A_0 . Normaalgesproken geldt dat $A_0 \approx 0,18m^2$ voor een reguliere loopstroom, wat leidt tot een stremmingsdichtheid (maximale dichtheid) van $\rho_{jam} = 5,4P/m^2$. Wanneer de afstanden tussen voetgangers groter worden door het aanhouden van 1,5 meter afstand, dan kunnen we uitrekenen welk verwacht effect dit heeft op A_0 , en dus op ρ_{jam} . Bij benadering kunnen we uitgaan dat voetgangers een cirkel innemen met een straal van 0,75 m. Het oppervlak van deze cirkel is $A_0^* \approx 1,77m^2$ waar een stremmingsdichtheid bij hoort van $\rho_{jam}^* = 0,56P/m^2$. Dit betekent dat de *opslagcapaciteit* met een factor 10 zal afnemen, als alle voetgangers zich aan de 1,5 meter afstandsregel houden.

De effecten op de *doorstroomcapaciteit* zijn beperkter. We bepalen hiertoe eerst de kritische dichtheid ρ_{crit} die wordt gevonden door te bepalen waar de vrije tak en de congestietak van het FD. Voor de vrije tak geldt $q(\rho) = v^0\rho$ waar de vrije snelheid ongeveer gelijk is aan 1,34 m/s. Voor de congestietak geldt $q(\rho) = \beta^{-1}(1 - \rho/\rho_{jam})$. Voor de normale situatie geldt dat $\rho_{crit} \approx 1,5P/m^2$ en dus $c = 2P/ms$. Dit betekent dat

$$c = q(\rho_{crit}) = \beta^{-1}(1 - \rho_{crit}/\rho_{jam}) = 2$$

en dus dat $\beta = 0,36$.

Gaan we er nu van uit dat β niet gevoelig is voor social-distancing, dan kunnen we uitrekenen wat de nieuwe capaciteit wordt bij verhoging van het minimale oppervlak A_0 als gevolg van de 1,5 meter maatregelen. Figuur 8 laat onze werkwijze zien.



Figuur 8: Bepaling kritische dichtheid ρ_{crit}^* en capaciteit c^* als gevolg van afname van de stremmingdichtheid ρ_{jam}^* , onder de aanname van gelijkblijvende parameters v^0 en van het fundamenteel diagram.

We bepalen de nieuwe kritische dichtheid door te bepalen waar, met de nieuwe waarde voor de stremmingdichtheid, de vrije tak en de congestietak elkaar snijden:

$$v^0 \rho_{crit}^* = 1,34 \rho_{crit}^* = \beta^{-1}(1 - \rho_{crit}^*/\rho_{jam}^*) = (1 - \rho_{crit}^*/0,56)/0,36$$

waaruit we kunnen opmaken dat $\rho_{crit}^* = 0,44P/m^2$. Hiermee vinden we een doorstroomcapaciteit van $c^* = 1,34 \cdot 0,44 = 0,59P/ms$. Dit is een afname van 70%. Opvallend is dat deze afname groter is dan de eerdere voorbeeld berekening uit §3.1.

Loopstromen en fietsstromen in knelpunten

We hebben eerder gezien dat bij loopstromen bepaalde patronen ontstaan die we kunnen gebruiken om te begrijpen hoe de capaciteit wordt bepaald uit het gedrag van de voetgangers. Bij de smalle doorgang zagen we dat bij een loopstroom door een (nauwe) gang die tot de capaciteit is belast **gestaffelde stroken** ontstaan (Hoogendoorn en Daamen, 2005). Binnen deze stroken houden voetgangers een zekere afstand tot elkaar (ongeveer 1,3 m). Het aantal stroken dat ontstaat wordt bepaald door de laterale afstand tussen de stroken (ongeveer 0,45 meter) en de schrikafstand tot de muren van de gang.

Deze kennis stelt ons in staat om het effect van social distancing op capaciteit te berekenen. Zo zien we dat in geval van een smalle gang er maximaal 1 strook vormt. De afstand tussen de voetgangers binnen een strook is 1,5 meter, mits mensen zich inderdaad aan de 1,5 m afstand houden. De reductie in de capaciteit betreft in dit geval zo'n 60%.

Voor fietsstromen vinden we vergelijkbare resultaten (zie Wierbos et al., 2019). Ook hier zien we dat fietsers gestaffelde patronen laten zien. De afstanden tussen de fietsers zijn echter beduidend groter, waardoor we niet verwachten dat de 1,5 meter afstandsregel een impact heeft op de capaciteit. Dit betekent niet dat de 1,5 meter afstand geen effect heeft: bij het opstellen bij bijvoorbeeld een verkeerslicht is de laterale afstand tussen fietsers makkelijk kleiner dan 1,5 meter.

Simulatie (bijvoorbeeld via het social forces model)

In bovenstaande is gekeken in hoeverre we met simpele, statische analyses een inschatting kunnen geven van het effect van social distancing op de capaciteit. In deze analyses worden vele impliciete aannames gedaan en wordt weinig rekening gehouden met de dynamiek van een loopstroom. Microscopische simulatie doet meer recht aan de complexiteit en dynamiek van het loopproces. Een bekend voorbeeld van een dergelijk model is het *social forces model*. Hier wordt de acceleratie van een voetganger uitgedrukt in relatie tot haar directe omgeving (met name de voetgangers in de buurt). In zijn meest simpele vorm luidt het model:

$$\mathbf{a}_i(t) = (v_i^0 - v_i(t))/\tau - A_0 \cdot \sum_{j=1}^J \exp(-r/R_0) \cdot n_{ij}(t)$$

met

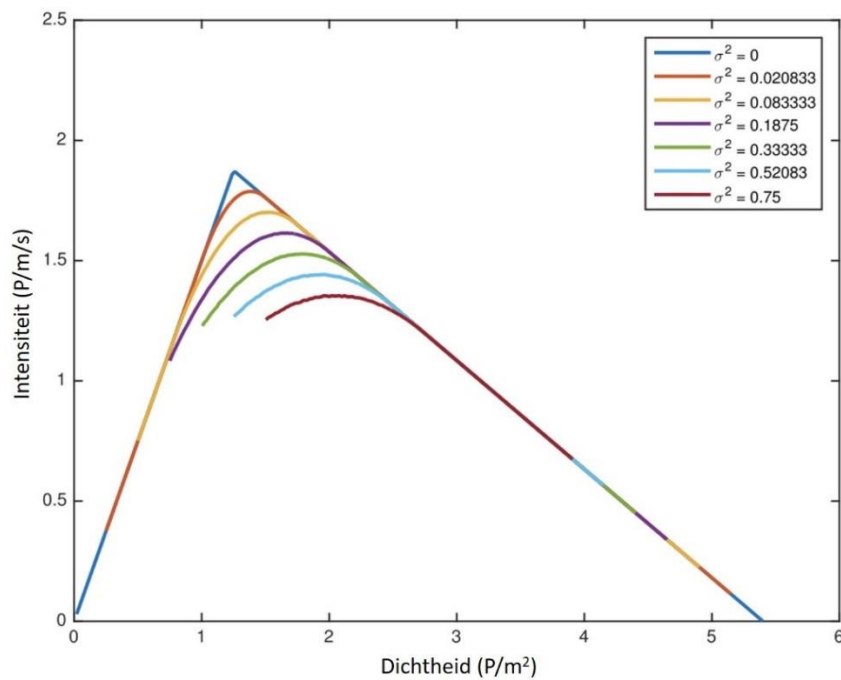
$$n_{ij}(t) = (x_j(t) - x_i(t)) / ||x_j(t) - x_i(t)||$$

In dit model zijn A_0 en R_0 parameters die het gedrag van een voetganger beschrijven; \mathbf{a}_i is de acceleratievector en v_i is de snelheidsvector van de voetganger; v_i^0 is de vector die de wensnelheid en richting bepaald. Social distancing kan in dit model worden beschreven door de parameterwaarden aan te passen die het gedrag van de voetganger beschrijven. Daarbij gaat het met name om A_0 en R_0 , die respectievelijk de mate waarin een voetganger uitwijkt voor anderen en de afstand waarop een voetganger uitwijkt bepalen. Bij een hogere R_0 zullen voetgangers meer afstand houden tot elkaar (social distancing). Vervolgens kan door te simuleren worden onderzocht wat het effect is op (bijvoorbeeld) de doorstroomcapaciteit en andere dynamische effecten.

6.2 Toepassing netwerk fundamenteel diagram voor knooppunten

In de voorgaande secties is inzicht gegeven hoe middels eenvoudige berekeningen de effecten van social-distancing kunnen worden gekwantificeerd. In deze sectie bespreken we kort in hoeverre we middels deze inzichten iets kunnen zeggen over de capaciteit van een knooppunt.

Het Netwerk Fundamenteel Diagram (NFD) kan hierin een belangrijke rol spelen, bijvoorbeeld door analyse van de resultaten van (microscopische) simulatie studies. In dit geval zouden we de verwachtingen omtrent het effect van de 1,5 meter maatregelen vervatten in de mathematische modellen die het gedrag van individuele voetgangers of loopstromen beschrijven. Dit maakt het mogelijk om vervolgens een knooppunt (e.g. een multimodale hub) te simuleren, waarmee we inzicht krijgen in het effect van de maatregelen op de doorstroom- en opslagcapaciteit van een knooppunt. Het NFD geeft vervolgens een overzicht van de macroscopische dynamiek van de afwikkeling in het knooppunt.



Figuur 9: Network Fundamenteel Diagram voor een loopstroom, waarin we de rol van de ruimtelijke spreiding (uitgedrukt in σ^2) zien op de vorm van het NFD.

Het NFD kan ook directer worden ingezet. Figuur 9 illustreert dit: op basis van een lokaal geldend fundamenteel diagram (FD) - in deze figuur de omsluitende driehoek - kunnen we een wiskundige relatie afleiden die het NFD uitdrukt in het lokaal geldende FD. Hierin speelt *de ruimtelijke spreiding van de dichtheid* een belangrijke rol. Indien deze spreiding nul is (met andere woorden, voetgangers zijn volledige homogeen over het knooppunt verdeeld), dan geldt logischerwijs overal het lokale FD. Indien de spreiding niet nul is - op sommige locaties is de dichtheid veel hoger dan op andere locaties - dan zien we dat de gemiddelde intensiteit naar beneden gaat. De doorstroomcapaciteit van het netwerk gaat dan ook naar beneden.

In sommige gevallen kunnen we een eenvoudige relatie afleiden tussen de verschillende grootheden. Om dit aan te tonen gebruiken we een simplificatie van de werkelijkheid, en nemen we aan dat het voetgangersverkeer lokaal wordt beschreven met het Greenshields fundamenteel diagram $q(\rho)$:

$$q(\rho) = v^0 \rho (1 - \rho / \rho_{jam})$$

Hierin is v^0 de vrije snelheid en ρ_{jam} de stremmingsdichtheid. Als dit FD lokaal geldt, dan kunnen we aantonen dat voor het netwerk / knooppunt, de volgende relatie geldt:

$$Q(\rho) = q(\rho) - (v^0 / \rho_{jam}) \sigma^2$$

Hierin is ρ de gemiddelde dichtheid en σ^2 de spreiding in de dichtheid. Voor de doorstroomcapaciteit van het netwerk geldt dan:

$$C = Q(\rho_{jam}/2) = v^0 \rho_{jam} (1/4 - (\sigma^2 / \rho_{jam}^2))$$

Hiermee zien we hoe we de lokale doorstroomcapaciteit kunnen gebruiken om de netwerkdoorstroomcapaciteit te bepalen. Daarmee kunnen we op grond van de analyse van de capaciteit van eenvoudige infrastructuur elementen *toch een uitspraak doen op de afwikkeling en doorstroomcapaciteitseffecten van de 1,5 m maatregel op een knooppunt of in een netwerk*. Voor meer details over de afleiding en toepassing van het NFD verwijzen we naar (Hoogendoorn et al., 2017).

Een belangrijke beperking van deze aanpak is de aanname dat overal hetzelfde FD geldt. Zeker in complexe knooppunten is dat niet het geval: toegangspoortjes, treindeuren, stijgpunten, etc., zijn dikwijls bepalend voor de afwikkeling in een knooppunt. Ofschoon er methoden bestaan om dergelijke discontinuïteiten mee te nemen in de analyse, leidt zo'n aanpak niet tot een gesloten uitdrukking voor de doorstroomcapaciteit van een netwerk. Bovengenoemde analyse laat echter wel zien dat er netwerkprocessen zijn (met name de spreiding van de drukte) die zorgen voor een afname van de gemiddelde doorstroomcapaciteit.

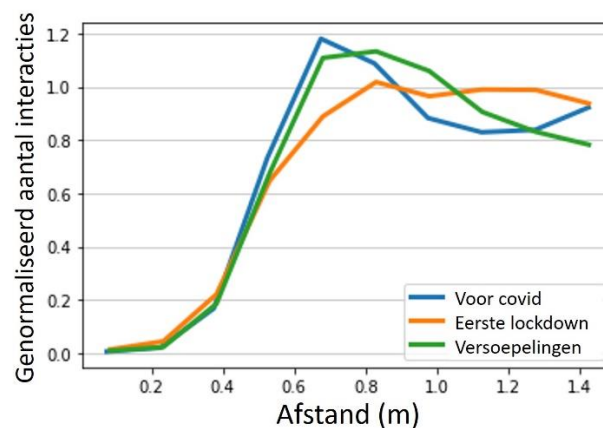
6.3 Verkennende empirische analyses

In de hierboven beschreven theoretische analyses is uitgegaan van 100% opvolging van de 1,5 meter maatregel. De vraag is echter in hoeverre reizigers, en met name voetgangers en fietsers, zich in de praktijk aan deze maatregel zullen houden.

In het kader van dit onderzoek is hiertoe een eerste data-analyse uitgevoerd. Deze analyses laten zien dat de aanname zeker niet correct is en dat veel mensen - in ieder geval tijdelijk - minder afstand houden dan 1,5 meter. We gebruiken hiertoe twee databronnen: data verzameld op NS stations via het SmartStation concept (Van den Heuvel et al., 2013) en data verzameld op de campus van de TU Delft. Beide databronnen geven microscopische informatie (posities van voetgangers als functie van de tijd), waaruit we kunnen afleiden of mensen interacties hebben met anderen (afstand minder dan 1,5 m) en hoe lang deze interacties duren. De SmartStation data is beschikbaar voor en tijdens COVID-19, de campus data alleen tijdens COVID-19.

Afstand houden voor, tijdens en na de eerste lockdown

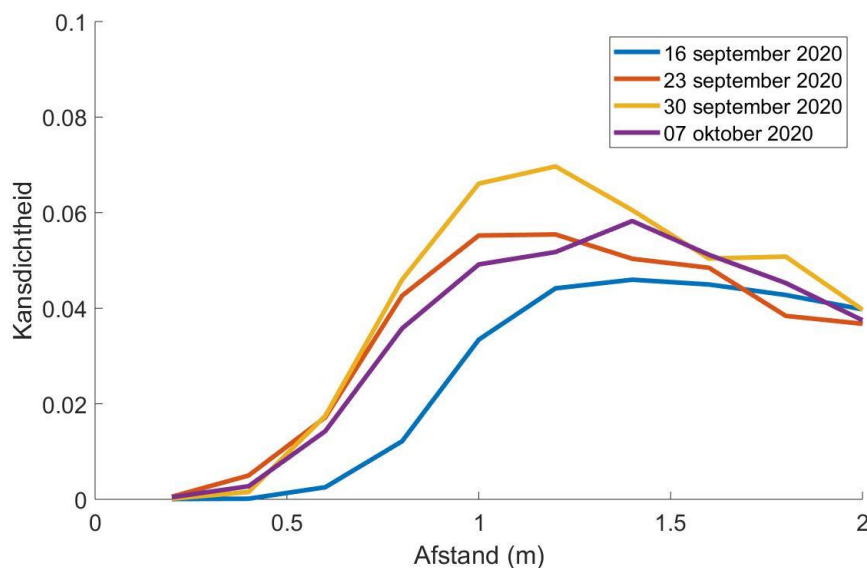
Om een beeld te krijgen van de minimale afstand tijdens een interactie is een histogram gemaakt, waarin het aantal interacties is berekend behorende bij een afstand categorie van 20 cm. Figuur 10 toont de hieruit afgeleide verdeling, waarbij het aantal interacties is genormaliseerd voor drie perioden (voor, tijdens en na de eerste lockdown), ingezoomd op de afstanden korter dan 1,5 m. Uit Figuur 10 blijkt dat tijdens de volledige lockdown het aantal afstanden korter dan 0,8 m het laagst is van alle scenario's. Het afstand houden lijkt dus toch effect te hebben, maar het wil zeker niet zeggen dat iedereen altijd voldoende afstand houdt. Bovendien is het effect weer verdwenen in de periode van het versoepelen van maatregelen: het aandeel afstanden kleiner dan 0,8 m is min of meer gelijk voor de periode voor COVID-19 en de periode van de versoepelingen.



Figuur 10: Genormaliseerd aantal interacties voor de verschillende minimale interacties voor een deel van een NS station voor COVID-19, tijdens de volledige lockdown en tijdens de periode waarin een aantal maatregelen weer is versoepeld.

De gegevens op de TU Delft campus zijn verzameld tijdens de tweede golf van de COVID-19 uitbraak in Nederland. Op 29 september 2020 kondigde de Nederlandse regering strengere maatregelen aan om verspreiding van het COVID-19 virus te voorkomen. We kunnen een duidelijke gedragsverandering zien op basis van de kenmerken van de interacties tussen twee voetgangers tussen deze twee fases. Figuur 11 toont de afstandsverdeling voor alle interacties voor vier verschillende dagen (woensdag in vier opeenvolgende weken) in een open buitenruimte, voor de faculteit Industrieel Ontwerpen van de TU Delft. In de eerste week van de getoonde waarnemingen (16 september) zijn de afstanden het grootst: de piek is het laagst, en ligt het meest naar rechts. In de week daarna zijn de afstanden kleiner, maar weer later, in de tweede fase, beweegt de piek weer verder naar rechts bewegen. Dat wil zeggen dat de mode (de afstand die het vaakst wordt waargenomen) bij een grotere afstand ligt wanneer later in de tijd wordt gekeken.

Beide trends impliceren dat de gemiddelde afstanden binnen de interacties afnemen als gevolg van de reactie van mensen op de overheidsregels. Oftewel, over een langere tijdsperiode blijken mensen *zich minder goed te houden aan de maatregel om 1,5 m afstand te houden*.



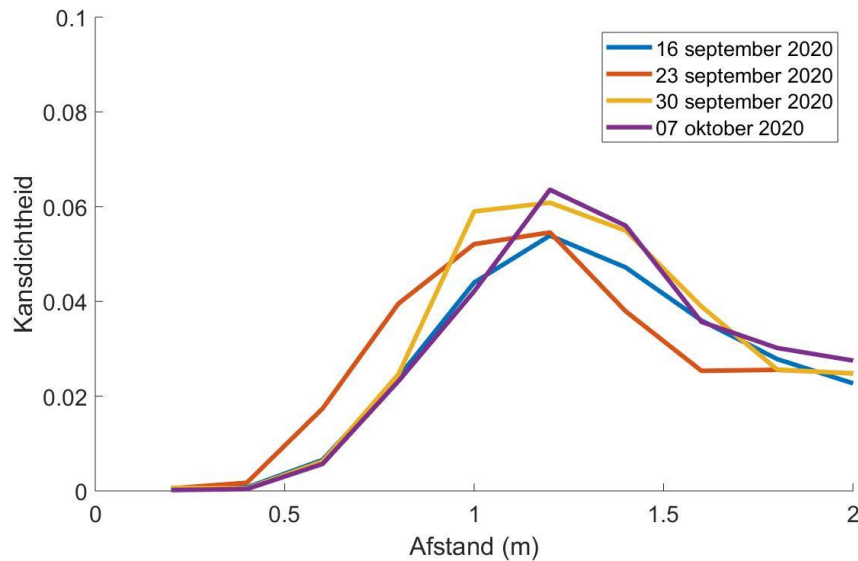
Figuur 11. Verdeling van afstand bij interacties op vier woensdagen in vier opeenvolgende weken op een open terrein voor de faculteit Industrieel Ontwerpen van de TU Delft, gevisualiseerd middels verdelingsfuncties en ingezoomd voor afstanden tot 2 m.

De met de tijd afnemende opvolging van de 1,5 m maatregel leidt er wel toe dat de capaciteitseffecten van social distancing (op termijn) kleiner zullen worden. Bovendien zien we dat mensen zich - ook tijdens de lockdown - lang niet altijd aan de 1,5 meter maatregel hielden. De capaciteitseffecten zijn navenant minder groot.

Afstand houden fietsstromen

Voor de *fietsstromen* op de campus van de TU Delft wordt gekeken naar vergelijkbare indicatoren als voor de *loopstromen*. Hiervoor nemen we als locatie het fietspad bij de Aula. Op dit fietspad rijden alle studenten en medewerkers die op weg zijn naar een zuidelijker gelegen faculteits- of onderwijsgebouw op de TU Delft campus. Figuur 12 toont de frequentieverdeling van de afstanden voor alle interacties over vier verschillende dagen (woensdag in vier opeenvolgende weken) op het fietspad voor de Aula van de TU Delft. Uit de figuur kunnen we opmaken dat er minder grote verschillen lijken te bestaan tussen de verschillende dagen voor fietsers dan voetgangers. Dit is een indicatie dat er minder sprake is van gedragsverandering bij fietsers dan

bij voetgangers, wat de veronderstelling bevestigt dat fietsers (en dus ook de afwikkeling van fietsverkeer) minder worden beïnvloed door de 1,5 meter maatregel. Nader onderzoek (o.a. bij opstelvakken voor verkeerslichten) is echter noodzakelijk.

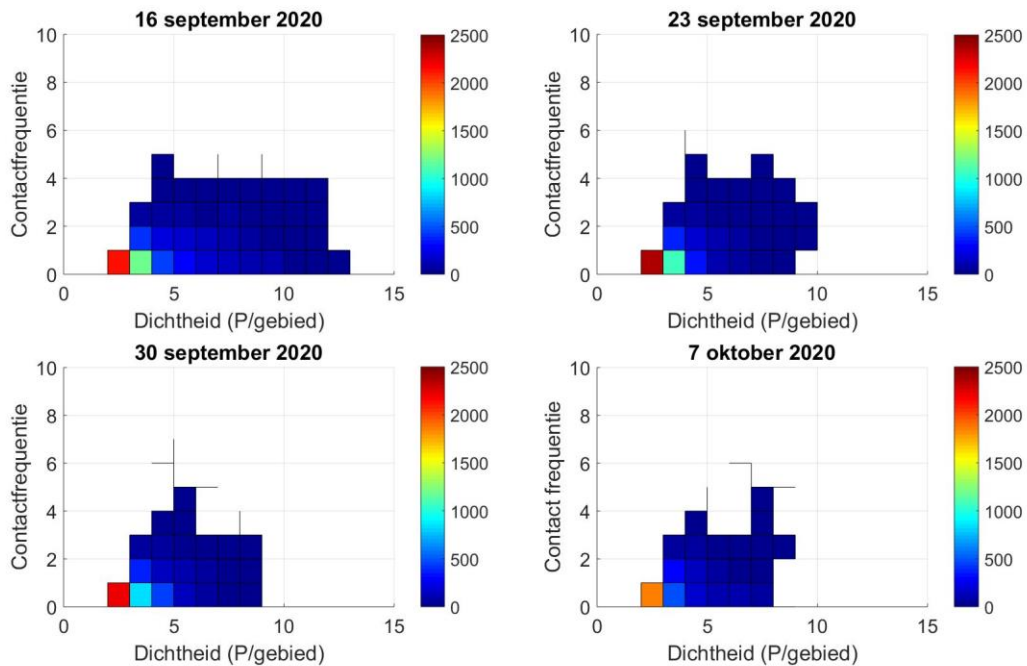


Figuur 12. Verdelingsfunctie van contact afstanden voor alle contact paren op vier woensdagen in vier opeenvolgende weken op het fietspad bij de Aula van de TU Delft, ingezoomd op afstanden tussen 0 en 2 m.

Interactiefrequentie en contactduur

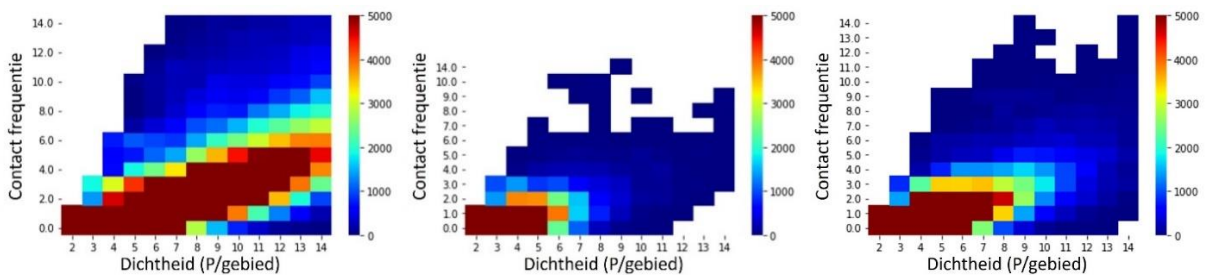
In deze paragraaf wordt het aantal keer dat een interactie tussen twee voetgangers plaatsvindt van minder dan 1,5 m bestudeerd, en wordt ook gekeken naar de totale tijd dat de interactie minder dan 1,5 m is. Zowel de frequentie als de duur van de interactie zijn van belang voor het bepalen van het besmettingsrisico. Om het daadwerkelijke besmettingsrisico te bepalen zijn niet voldoende gegevens bekend van het virus, met de interactie frequentie en de contactduur geven wel een indicatie van hogere en lagere risico's, en kunnen dus worden gebruikt om verschillende situaties te vergelijken (bv over tijd of op verschillende locaties).

Figuur 13 toont deze interactiefrequentie als functie van de dichtheid, het aantal mensen per oppervlak. Hierbij is een interactie alleen meegenomen als de afstand tussen de twee voetgangers kleiner is dan 1,5 m. De verwachting is dat als het aantal personen in een bepaald gebied toeneemt, ook het aantal interacties op minder dan 1,5 m afstand toeneemt. De figuur laat zien dat dat ook inderdaad het geval is, zeker bij een klein aantal personen (4 personen of minder). Dit lijkt niet afhankelijk te zijn van de mate waarin afstand wordt gehouden, aangezien de vier verschillende dagen geen verschillende patronen laten zien in Figuur 13.



Figuur 13: Contactfrequentie als functie van de dichtheid op vier woensdagen in vier opeenvolgende weken op een open terrein voor de faculteit Industrieel Ontwerpen van de TU Delft. De kleur geeft het aantal waarnemingen aan voor een specifieke contactfrequentie bij een bepaald dichtheidsniveau.

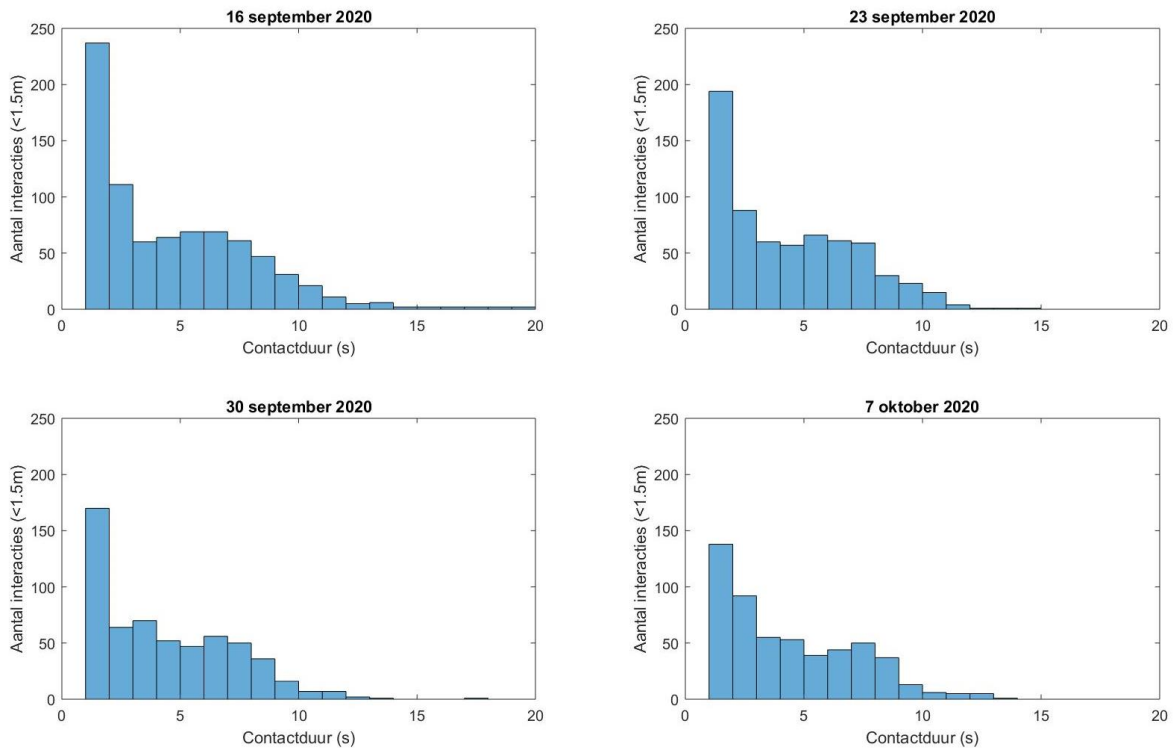
Dat deze trend van meer interacties doorzet bij hogere dichtheden is te zien in Figuur 14, die gemaakt is op basis van de data van een NS station. De omstandigheden (lockdown vs geen lockdown) hebben vooral invloed op het aantal keer dat een bepaalde contactfrequentie bij een bepaalde dichtheid is waargenomen. De contactfrequentie was niet lager tijdens de volledige lockdown, en het bijbehorende 1,5 m afstand houden. Dit bevestigt de eerdere bevinding dat reizigers niet consequent 1,5 m afstand houden op stations.



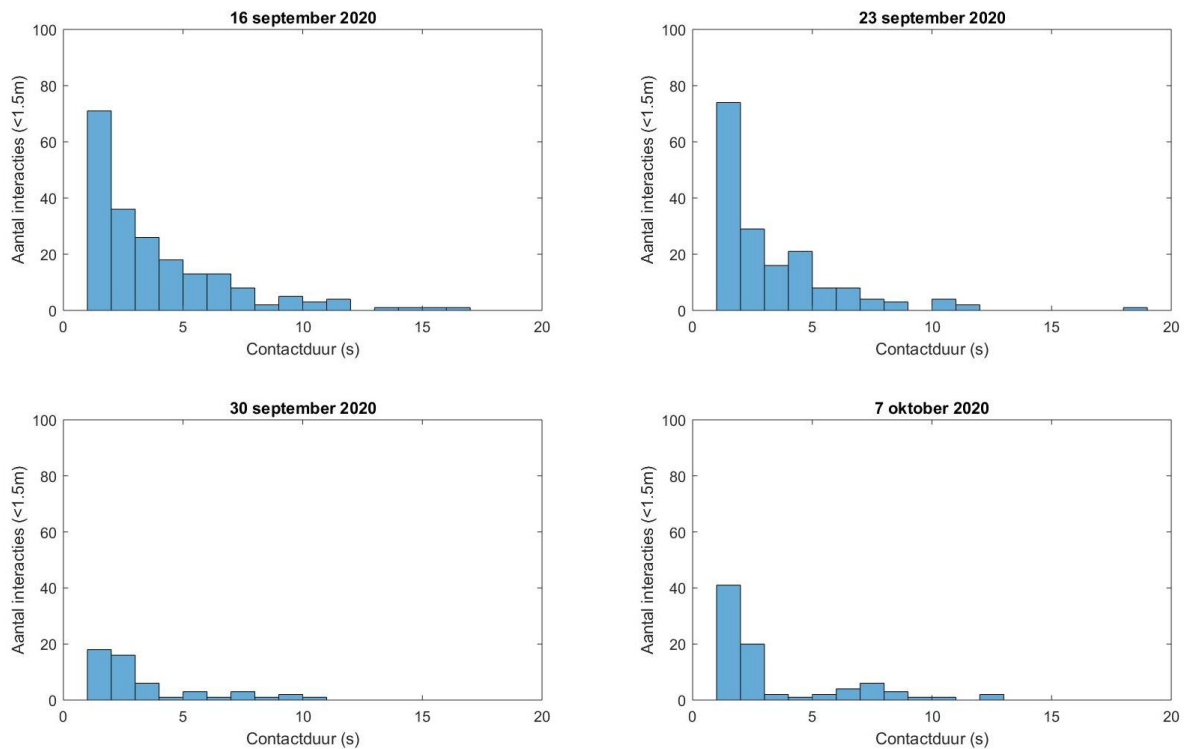
Figuur 14: Ingezoomd op de contactfrequentie als functie van de dichtheid voor een deel van een NS station voor COVID-19 (links), tijdens de volledige lockdown (midden) en tijdens de periode waarin een aantal maatregelen weer zijn versoepeld (rechts), zodat het totaal aantal personen in het gebied (uitgezet op de x-as) gelijk is voor de verschillende perioden. De kleur geeft het aantal waarnemingen aan voor een specifieke contactfrequentie bij een bepaald dichtheidsniveau (hoe roder, hoe meer waarnemingen, en dus interacties).

Tot slot toont Figuur 15 een verdeling van de maximaal waargenomen contact duur van een contact paar, met een bovengrens van deze contact duur van 15 s. Vergelijkbare waarnemingen zijn te vinden op andere plaatsen, bijvoorbeeld op de bushaltes op de campus (zoals weergegeven in Figuur 15, op een van de busperrons voor de CiTG-faculteit). Het blijkt dat de contactduur erg

beperkt is (max 15 seconden). Dat komt enerzijds doordat de locatie voor de faculteit Industrieel ontwerpen geen verblijfsgebied is, maar doorgangsgebied, waarbij mensen niet stilstaan, maar zich bewegen naar hetzij de ingang van de faculteit of daar net vandaan zijn gekomen en zich begeven naar hun volgende bestemming. Ook bij een typisch verblijfsgebied als een busperron blijken de contactduren erg beperkt te zijn. Beide locaties impliceren dan ook dat het risico op een virus overdracht tussen twee personen laag is wanneer ze zich als voetganger voortbewegen.



Figuur 15: Verdeling van de contactduur voor alle contact paren op vier woensdagen in vier opeenvolgende weken op een open terrein voor de faculteit Industrieel Ontwerpen van de TU Delft.



Figuur 16: Verdeling van de contactduur voor alle contact paren op vier woensdagen in vier opeenvolgende weken op een busperon voor de faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, TU Delft.

7. Conclusies en aanbevelingen

Dit artikel presenteert de (mogelijke) invloed van COVID-19 op de aanbodkant van het mobiliteitssysteem. Dit is gedaan op grond van de beperkt beschikbare literatuur, theoretische verkeerskundige analyses en een eerste analyse van data van loopstromen en fietsstromen voor en tijdens de verschillende fasen van de huidige crisis.

7.1 Verkennende theoretische en empirische analyses

Om de impact van COVID-19 op het mobiliteitssysteem te kenmerken is eerst een conceptueel model opgesteld. Dit model laat zien welke onderdelen we binnen het mobiliteitssysteem kunnen identificeren, hoe deze samenhangen en welke hoofdfactoren de afwikkeling in multimodale netwerken beïnvloeden. In de basis is de invloed op de aanbodkant vooral toe te schrijven aan social distancing (en andere maatregelen die de capaciteit beïnvloeden), en/of veranderingen in gedrag omdat mensen bang zijn besmet te worden. Dit heeft invloed op loop- en (in mindere mate) fietsstromen en op de maximale bezettingsgraad van (OV) voertuigen.

In de literatuur is nog weinig bekend over de invloed van social distancing op de verkeersafwikkeling. Dit artikel geeft een beknopt overzicht van de belangrijkste bronnen. Op grond van theoretische analyses zijn inschattingen gemaakt van de invloed van afstand houden op de capaciteit, waarbij de focus ligt op reizigers in knooppunten. Deze analyses laten zien dat indien mensen zich aan de afstandsregels houden, de *doorstroomcapaciteit* van een enkelvoudig infrastructuur element (een gang, een plein) naar verwachting met 60-70% zal afnemen. Kijken we naar een netwerk, dan zien we een extra reductie in de doorstroomcapaciteit van het hele netwerk. Deze reductie is afhankelijk van hoe gelijkmatig de voetgangers over het knooppunt zijn verdeeld. De *opslagcapaciteit* zal naar verwachting met een factor 10 afnemen.

De theoretische analyses zijn uitgevoerd onder de veronderstelling dat mensen zich aan de 1,5 meter regel houden. Onze data-analyses laten zien dat dit zeker niet het geval is: er zijn nog steeds relatief veel interacties binnen een afstand van 1,5 meter. Onze analyses laten wel zien dat dit er (relatief) minder zijn, ook als we corrigeren voor de afname in de vraag. Ook *lijkt* de data te wijzen op een invloed van maatregelen (bijvoorbeeld afkondiging lockdown) en tijd (mensen geven op den duur minder opvolging aan de 1,5 meter maatregel). De interacties zijn veelal kort (< 15 s), waarbij bij de reguliere variant van het virus de kans op besmetting waarschijnlijk klein zal zijn. Bij fietsers zien we op grond van de beperkte interacties nauwelijks een effect van de 1,5 meter maatregel.

7.2 Relevantie voor de praktijk en voor beleid

Dit artikel beschrijft de impact die uitgaat van COVID-19 en de verschillende maatregelen die zijn getroffen op de aanbodzijde van het mobiliteitssysteem. Met name de 1,5 meter maatregel, en de mate waarin voetgangers en fietsers hun gedrag aanpassen aan deze maatregel, heeft een substantieel effect op de capaciteit van loop- en fietsinfrastructuur. In combinatie met de effecten op de verkeersvraag leidt een verandering in de capaciteit tot een verandering in het verkeersbeeld: meer of juist minder congestie en vertragingen. Een inschatting van de effecten is dus alleen mogelijk met inzicht in de effecten van COVID-19 op de capaciteit en het werkelijke gedrag van – met name – voetgangers en fietsers. Dit laatste kan gebruikt worden bij het vaststellen van nieuwe wiskundige modellen die gebruikt kunnen worden in simulatie, waarmee de huidige situatie maar ook de effecten van maatregelen en beleid kunnen worden doorgerekend.

Een van de implicaties van het onderzoek is dat met name voetgangers meer ruimte nodig hebben om het huidige afwikkelingsniveau te behouden. Dit kan bijvoorbeeld door een beter gebruik van de beschikbare ruimte (bijv. via circulatieplannen of crowdmanagement), of door extra ruimte vrij te maken voor voetgangers (bijv. fietsers naar de rijbaan). De resultaten van dit artikel zijn belangrijke inzichten voor het ontwerpen en evalueren van dergelijke maatregelen.

We hebben gezien dat voetgangers en fietsers zich niet altijd aan de 1,5 meter houden. Hierdoor is de reële verandering in de capaciteit aanzienlijk beperkter dan de theoretische. Bij fietsers zien we zelfs nauwelijks verschil tussen de situatie voor en tijdens COVID-19. Vanuit verkeerskundig perspectief is dit een positieve bevinding, maar vanuit het perspectief van de verspreiding van het virus natuurlijk niet. De interacties zijn zelden langer dan 15 s voor de hier beschouwde situaties, maar het is niet ondenkbaar dat in andere situaties (voor verkeerslichten, op treinperrons) de interacties langer en dus risicovoller kunnen zijn. Ook hier moet met het ontwerpen van interventies goed rekening mee worden gehouden. De voor de TU Delft campus ontwikkelde *digital twin technologie* kan hierin van toegevoegde waarde zijn (zie hieronder).

7.3 Lopend vervolgonderzoek

In deze studie is een beperkte data analyse uitgevoerd. Om meer betrouwbare uitspraken te kunnen doen over het effect van social distancing op afwikkeling zijn meer uitgebreide data analyses nodig. Het MOCOLODO project doet hier onderzoek naar (<https://www.zonmw.nl/nl/over-zonmw/coronavirus/programmas/project-detail/COVID-19-programma/mobiliteit-tijdens-en-na-corona-lock-down-duurzaamheid-veiligheid-inclusiviteit/>), o.a. gebruikmakend van de gegevens uit het Outdoor Mobility Digital twin (OMDt) project van de TU Delft (<https://www.tudelft.nl/en/Covid/projects/mobility-dashboard/>). In dit project worden real-time zeer gedetailleerde mobiliteitsdata verzameld (loopstromen, fietsen, openbaar vervoer, autoverkeer, etc.).

Daarnaast is een van de mogelijkheden het ontwikkelen van gevalideerde bewegingsmodellen voor voetgangers en fietsers op grond van deze data. Dit is een van de doelstellingen van het Samen Slim Open project (<https://www.samenslimopen.nl>). Dit geeft zowel inzicht in effecten van

de verschillende maatregelen op de afwikkeling, als inzichten in besmettingsrisico's (voor verschillende virustransmissiemodellen).

Tenslotte kunnen zowel de inzichten uit dit project als de in ontwikkeling zijnde simulatiemodellen gebruikt worden bij het weer openstellen van bepaalde diensten, zoals practica en tentamens bij universiteiten. Een concreet onderzoeksprogramma wordt op dit moment ontwikkeld, met als eerste pilot de snelsten voor tentamens op de campus van de Rijksuniversiteit Groningen (<https://www.rijksoverheid.nl/actueel/nieuws/2021/01/18/snelsten-in-onderwijs-van-start>) en in voorbereiding pilots met snelsten bij practica bij de TU Delft.

7.4 Aanbevelingen vervolgonderzoek

Naast de lopende projecten beschreven in de vorige paragraaf, leidt het onderzoek beschreven in dit artikel tot de volgende meer algemene aanbevelingen voor vervolgonderzoek.

Figuur 2 toont een conceptueel raamwerk waarin de gevolgen van COVID-19 op de capaciteit van een multimodaal netwerk zijn aangegeven. Voor meerdere blokken in dit raamwerk geldt echter dat er nog geen, of in ieder geval niet voldoende inzicht is. Het gaat dan met name om hoe het reisgedrag (en dus de verkeersvraag) verandert door de kennis over de verspreiding van het virus, maar ook om hoe de capaciteit van de verschillende modaliteiten verandert.

Een eerste aanbeveling voor vervolgonderzoek is dan ook hoe de verkeersvraag is veranderd gedurende de COVID-19 pandemie en wat de invloed was van de verschillende scenario's en maatregelenpakketten op de verschillende modaliteiten. Dat kan ook inzichten opleveren over de effectiviteit van de verschillende maatregelen, hoe soortgelijke maatregelen gebruikt zouden kunnen worden bij het duurzamer maken van het verkeerssysteem en wat de lange-termijn gevolgen zijn van bepaalde gedragsveranderingen van reizigers. Meer specifiek zou hier ook de modaliteitskeuze verder moeten worden onderzocht: onder welke omstandigheden kiezen mensen voor het openbaar vervoer, en in hoeverre wordt gekozen voor duurzamer alternatieven als de fiets.

Een tweede aanbeveling is gerelateerd aan het identificeren van gedragsveranderingen en de gevolgen daarvan voor de capaciteit van de verschillende modaliteiten. In dit artikel is een eerste aanzet gedaan hiervoor voor de voetgangers- en fietsstromen. Vervolgonderzoek is echter nodig om op basis van meer empirische data meer inzicht te krijgen in de capaciteitsverandering door het instellen van maatregelen. Deze gedragsinzichten kunnen dan verwerkt worden in theorieën en modellen, waarmee de capaciteitsveranderingen nauwkeuriger kunnen worden voorspeld.

Een derde aanbeveling is meer gerelateerd aan de verspreiding van COVID-19 in het verkeerssysteem. Hoewel al een aantal theoretische studies is uitgevoerd, kunnen deze uitgebreid worden met de laatste stand van de kennis rondom de verspreiding van COVID-19. Ook de validatie van deze theorieën en modellen met beschikbare data van de COVID-19 verspreiding is essentieel om de toepasbaarheid te vergroten.

Referenties

- Ambühl, L., Loder, A., Bliemer, M. C., Menendez, M., & Axhausen, K. W. (2018). A functional form with a physical meaning for the macroscopic fundamental diagram. *Transportation Research Part B: Methodological*.
- Chu, D.K., Akl, E., Duda, S., Solo, K., Yaacoub, S., Schünemann, H. J. (2020). Physical distancing, face masks, and eye protection to prevent person-to-person transmission of SARS-CoV-2 and COVID-19: a systematic review and meta-analysis. *The Lancet*. 395(10242). [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)31142-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)31142-9)
- Daamen, W., van Binsbergen, A., van Arem, B., & Hoogendoorn, S. P. (2020). Urban Mobility Observatory. In *Traffic and Granular Flow 2019* (pp. 457-463). Springer, Cham.
- Duives, D., Chang, Y., Sparnaaij, M., Wouda, B., Boschma, D., van Veen, L., Yuan, Y., Daamen, W., de Jong, M., Sikkema, R., Teberg, C., Schachtschneider, K., Yangfan, ten Bosch, Q. (in bewerking) The multi-dimensional challenges of controlling SARS-CoV-2 transmission in indoor spaces: Insights from the linkage of a microscopic pedestrian simulation and virus transmission models.
- Geroliminis, N., & Daganzo, C. F. (2008). Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings. *Transportation Research Part B: Methodological*, 42(9), 759-770.
- Hale, T., Webster, S., Petherick, A., Phillips, T., & Kira, B. (2020). Oxford COVID-19 government response tracker (OxCGRT). Last updated, 19 February 2021. Hoogendoorn, S. P., & Daamen, W. (2005). Pedestrian behavior at bottlenecks. *Transportation Science*, 39(2), 147-159.
- Hoogendoorn, S. P., Daamen, W., Knoop, V. L., Steenbakkens, J., & Sarvi, M. (2018). Macroscopic fundamental diagram for pedestrian networks: theory and applications. *Transportation Research part C: Emerging Technologies*, 94, 172-184.
- Jenelius, E. and Cebecauer, M. (2020) Impacts of COVID-19 on public transport ridership in Sweden: Analysis of ticket validations, sales and passenger counts. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives* 8, 100242.
- Kucharski, R., Cats, O. (2020). When sharing is not always caring: On the spreading processes in ride-sharing networks. <https://www.linkedin.com/pulse/when-sharing-always-caring-spreading-processes-rafa%25C5%2582-kucharski/?trackingId=S28punKTRECG2lbMhrc70g%3D%3D>
- Kretz, T. (2020). <https://lnkd.in/dztfRnv>
- Shelat, S., Cats, O., Van Cranenburgh, S. (2020). Avoiding the crowd: How do passengers trade-off time and crowding in the age of COVID-19. https://www.researchgate.net/publication/342392070_Avoiding_the_crowd_How_do_passengers_trade-off_time_and_crowding_in_the_age_of_COVID-19_working_paper
- Translink (2020). Bibliotheek. Retrieved June 6, 2020, from: <https://www.translink.nl/library>
- Van den Heuvel, J. P. A., Thiellier, E., & Gerwen, N. (2013). Privacy by design bij reizigersmetingen op stations. *Privacy & Compliance*, 2 (3), 2013.
- Van der Horst, C.G. (2020). Public Transport during coronavirus outbreak: A research of measures taken in Dutch and international PT. Bachelor Thesis, Delft University of Technology, <http://resolver.tudelft.nl/uuid:60ddc720-0b40-4de8-83b4-c9dd9e07ee0e>
- Van Schaik, L., Duives, D., Hoogendoorn, S.P. (2020) COVID-19 capacity framework for pedestrian infrastructures during social distancing.
- Van Lint, H., en V. Marchau (2011). *De File ben je Zelf*.

Wierbos, M. J., Knoop, V. L., Hänseler, F. S., & Hoogendoorn, S. P. (2019). Capacity, capacity drop, and relation of capacity to the path width in bicycle traffic. *Transportation research record*, 2673(5), 693-702.