

# Effecten LEVs op verkeersdoorstroming

dr. Victor L. Knoop  
dr. ir. Wouter J. Schakel

June 2020





## Introductie

Het wegennet raakt steeds voller, en vertragingen door files op de weg kosten in Nederland jaarlijks miljarden euro's (Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid, 2019). Een interessante ontwikkeling zijn smalle voertuigen. In de stedelijke omgeving zien we bijvoorbeeld wagentjes van Picnic, buiten de stad zien we driewielige motorfietsen. Doordat deze voertuigen smaller zijn, nemen ze minder ruimte in op de weg en kunnen ze door de file heen rijden. Daarnaast zijn er mogelijkheden om – als er twee smalle bij elkaar rijden – naast elkaar in een rijstrook te rijden. Dit rapport onderzoekt wat de effecten van dit soort smalle voertuigen op de vertraging kunnen zijn. Daarbij kijken we naar de vertraging voor alle verkeersdeelnemers bij elkaar (totale vertraging), die een maat is voor hoe veel kosten met de files gemoeid zijn. Daarnaast kijken we naar hoeveel voordeel het voor een individuele weggebruiker oplevert om over te stappen naar een smal voertuig.

Een eerder rapport van de Transport&Mobility Leuven (Yperman, 2011) benadert hetzelfde probleem op een versimpelde manier. Dat beschouwt de motorfietsen met een zogenaamde *passenger car equivalent*, die aangeeft welk deel van de capaciteit van een auto ingenomen wordt door een motorfiets. De fijne structuur van het soms wel en soms niet tussen de stroken door kunnen rijden, alsook het soms naast elkaar kunnen rijden, gaat daarmee verloren.

## Aanpak

Voor het beantwoorden van de vragen, kiezen we voor een aanpak met macroscopisch model. Op dat niveau worden gemiddelde snelheden, intensiteit [vtg/h] en dichtheid [vtg/km] beschreven. We kiezen voor deze aanpak omdat er op dat niveau wetmatigheden te formuleren zijn. Een lager niveau zou individuele beschrijvingen vereisen, wat het lastig te implementeren maakt, en tegelijk niet meer realisme toevoegt aangezien de geïmplementeerde wetmatigheden hetzelfde zijn.

Op basis van het veronderstelde gedrag bepalen we wat voor snelheden we verwachten voor elk van de type voertuigen in welke situatie (sectie 0.3). Hoe het model werkt om de dynamiek te beschrijven (waar en wanneer ontstaan files) komt daarna aan de orde. Om de effecten te bepalen kiezen we voor een model-netwerk met een bepaalde hoeveelheid verkeer, wat gepresenteerd wordt in sectie “Case study”. De resultaten volgen in sectie 0.6 gevolgd door de conclusies.

## Fundamentele diagrammen

Een veel gebruikt begrip in verkeerskunde is het fundamenteel diagram (FD). Deze beschrijft de relatie tussen dichtheid (vtg/km), doorstroming (vtg/h) en de snelheid (km/h). De klassieke vorm hiervan is een driehoekig FD als doorstroming wordt uitgezet tegen dichtheid zoals figuur 1 (Daganzo, 1997). Op de horizontale as staat dichtheid, op de verticale as van figuur 1(a) de snelheid. We nemen aan dat de snelheid van het verkeer bij lage dichtheden onafhanke-

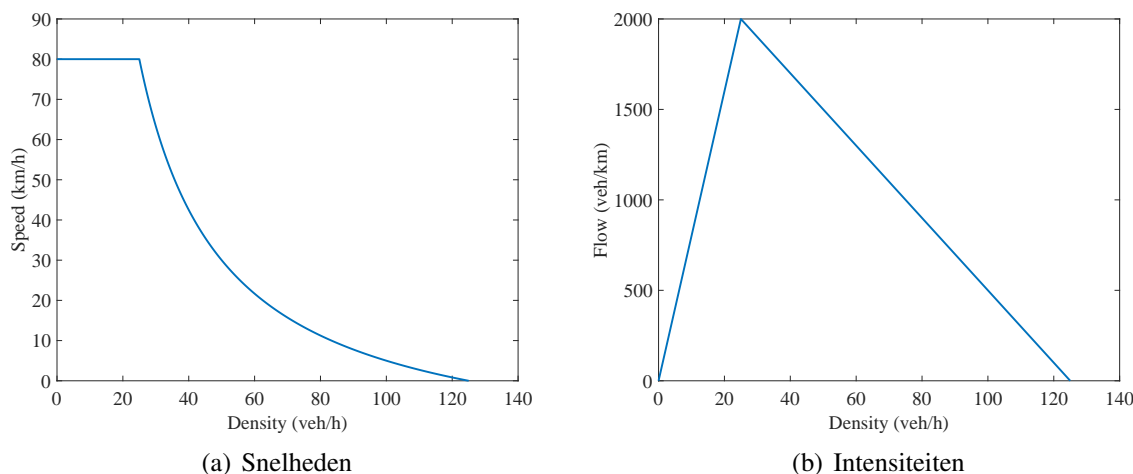


Figure 1: Fundamenteel diagram voor 1 klasse

lijk is van de dichtheid – dat wil zeggen, voor de snelheid maakt het niet uit of het rustig is op de weg of heel rustig. Pas na een bepaalde dichtheid, de zogenaamde kritische dichtheid (hier gekozen op 25 vtg/km) neemt de snelheid af. Die dichtheden horen dus ook bij file. In een file neemt niet alleen de snelheid af, maar ook de doorstroming, zoals figuur 1(b) laat zien. De linker tak van deze grafiek geeft vrij verkeer weer dat met de maximum snelheid rijdt. De rechter tak geeft congestie weer.

Om de invloed van LEVs op verkeer te onderzoeken is de klassieke FD uitgebreid. Omdat LEVs fundamenteel afwijkend verkeersgedrag vertonen ten opzichte van auto's, is hierin de fundamentele relatie voor LEVs gesplitst van auto's. Zodoende volgen er twee relaties die elk de snelheid van een van beide type voertuigen weergeven. Deze zijn sterk van elkaar afhankelijk aangezien het verkeersgedrag van LEVs afhankelijk is van de dichtheid en snelheid van het overige verkeer, en vice versa.

Voor de snelheden implementeren we de volgende principes:

- De snelheid van het autoverkeer en LEV verkeer wordt – als er een – beschreven met een zogenaamd driehoekig fundamenteel diagram in stroom-dichtheid. Dat betekent dat de snelheid van het verkeer tot een kritische dichtheid constant is, en daarna daalt.
- LEVs rijden dezelfde snelheid als het autoverkeer als ze met de stroom meerijden
- LEVs kunnen onder een bepaalde snelheid (50 km/h) tussen de auto's door rijden; dat doen ze met een snelheid die afhangt van de dichtheid, of een snelheidsverschil van maximaal 20 km/h ten opzichte van het autoverkeer; LEVs verdelen zich ook over de overige stroken als die sneller gaan. Deze aanname is gebaseerd op het idee van motorfietsen. We kiezen bewust voor een extra strook tussen het verkeer, en niet tussen

---

elke stook zodat de automobilisten – net als voor motorrijders – duidelijk weten waar ze een LEV kunnen verwachten. Ook zijn er door het aanwijzen van een specifieke strook mogelijkheden voor automobilisten om ruimte te maken voor LEVs. De drempelwaarde voor snelheid en snelheidsverschillen is gebaseerd op de huidige praktijk.

- Als er 2 LEVs achter elkaar rijden, kunnen die naast elkaar op een strook gaan rijden en nemen ze de ruimte van 1 auto in.

Om het volledige gecombineerde FD weer te geven worden de dichtheden van auto's en LEVs weergegeven op de x-as en y-as. In kleur wordt vervolgens of snelheid, of doorstroming weergegeven, voor één van de modi. Dit levert vier grafieken zoals in figuur 3. De grafieken zijn in drie gebieden op te delen (zie ook figuur 2:

1. Een driehoek linksonder geeft vrije doorstroming weer, waar de snelheden voor beide modi gelijk zijn. De driehoek bevat ook een deel congestie met snelheden boven 50km/h. LEVs hebben hierbij dezelfde snelheid als auto's.
2. Voor de meeste overige dichtheden geldt een continuering van de congestietak waarbij de snelheden gelijk zijn omdat het aanbod LEVs hoog genoeg is om de ruimte tussen de auto's dermate te vullen dat de snelheden dalen tot de snelheid van de auto's. Onder deze omstandigheid maakt het voor LEVs niet uit of ze op de reguliere stroken, of tussen de stroken rijden.
3. De driehoek-achtige vorm rechtsonder is het gebied waar het aantal LEVs laag genoeg is om een snelheidsvoordeel tussen de stroken te behouden. Dit zorgt gelijk ook voor een snelheidsverhoging voor auto's aangezien de reguliere stroken rustiger zijn, gegeven de LEVs die tussen de stroken rijden.

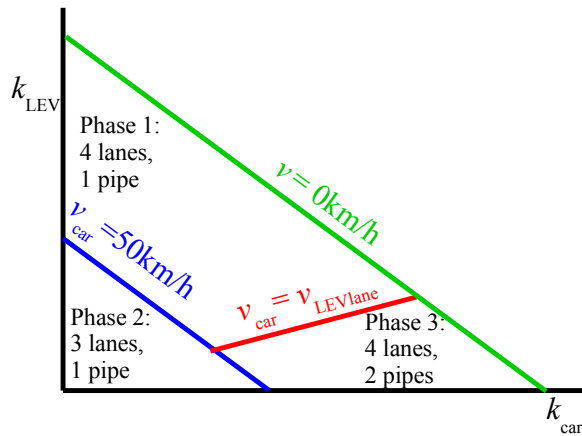


Figure 2: De verschillende gebieden bij drukte; de assen geven de dichtheid aan voor de verschillende klassen – aangegeven met  $k$ . Het aantal stroken (“lanes”) is aangegeven voor elk gebied, alsook of er al dan niet een tweede stroom met een andere snelheid op de weg is (1 vs 2 pipes)

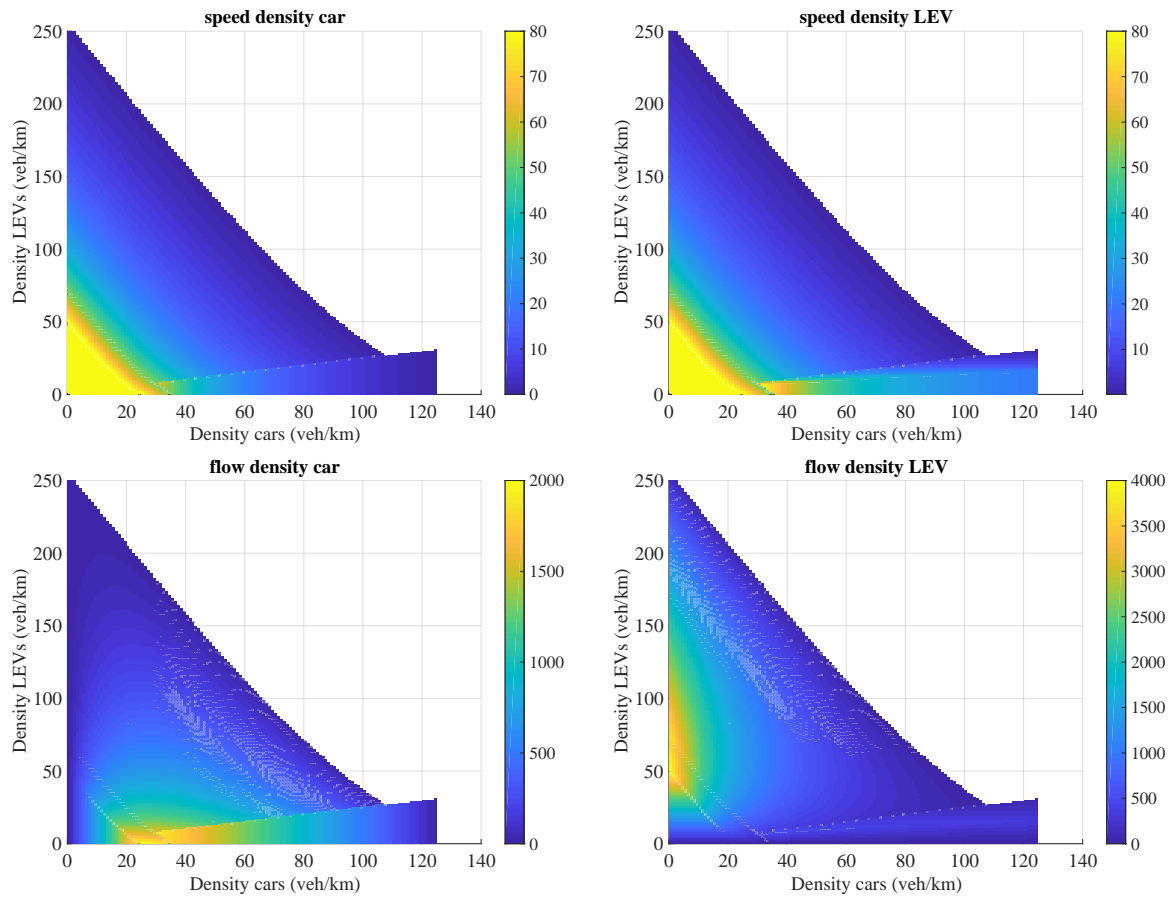


Figure 3: Fundamentele diagrammen voor beide klassen. Bovenste regel: snelheden. Onderste regel: intensiteiten.

De capaciteiten voor verschillende fracties LEV verkeer worden bepaald door naar het maximum van de totale intensiteit (LEV plus auto's). Dat maximum varieert als functie van het aandeel LEVs, en is als volgt weer te geven.: Het figuur toont dat de capaciteit al snel

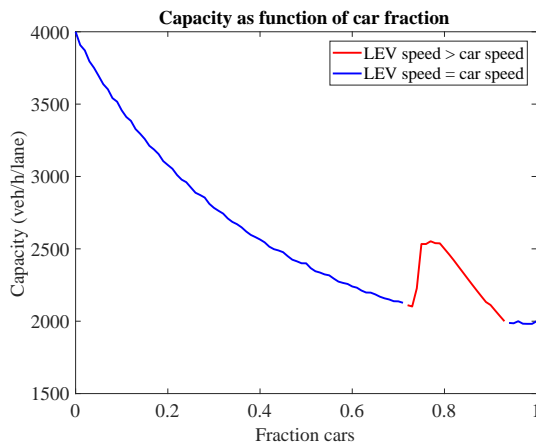


Figure 4: De capaciteit als functie van de fractie autoverkeer

toeneemt voor LEV fracties tot 20%. Deze capaciteit wordt echter behaald bij auto snelheden onder 50km/h, zodat de LEVs tussen de stroken kunnen rijden: wel een hoge doorstroming dus, maar tegelijk wel lagere snelheden. Deze capaciteiten liggen in gebied 3 (rechts onder). De capaciteit daalt vervolgens bij een verdere toename van LEVs omdat de snelheid tussen de stroken afneemt door toenemende dichtheid van LEVs. Net zoals bij de congestietak van een klassiek FD, neemt de doorstroming tussen de stroken af bij toenemende dichtheid. Deze capaciteitsdaling voor een toenemend aandeel LEVs treedt op totdat de snelheid tussen de stroken gelijk is aan de snelheid van de overige stroken. Capaciteiten bij hogere fracties LEVs liggen in gebied 2. In dit gebied neemt de capaciteit weer toe met meer LEVs omdat LEVs naast elkaar kunnen rijden.

## Oplossingsmethode

Om het reistijdvoordeel, voor auto's en LEVs, te bepalen, wordt simulatie toegepast. Als flessenhals wordt hier een afvallende rijstrook gehanteerd, van 4 naar 3 rijstroken. Het aantal rijstroken bepaalt de totale gecombineerde FD, welke zodoende verschillend is voor 4 of 3 rijstroken. Ter hoogte van de versmalling volgt een interessante overgang. We kiezen een cell-based methode. Deze berekent hoeveel verkeer er van elke modus van de ene naar de volgende cell kan doorstromen. Hierbij gelden complexe afhankelijkheden, maar in het algemeen zijn dichtheden hierin bepalend. De exacte bepaling van de hoeveelheid voertuigen van elke modus die kan doorstromen wordt bepaald met een HLL-solver. Figuur 5 geeft een impressie van de dynamische situatie. De positieve as geeft de dichtheid van auto's, de negatieve as geeft de dichtheid van LEVs. De kleuren geven de snelheden aan. In dit voorbeeld is het aandeel LEVs 5. Voor auto's en LEVs begint de file op hetzelfde moment, en is de file ook altijd even lang (immers, de LEVs moeten ook afremmen als ze in de file terechtkomen). Echter, in dit geval zijn de snelheden voor de LEVs in file hoger omdat ze met een hogere snelheid tussen de auto's door kunnen rijden.

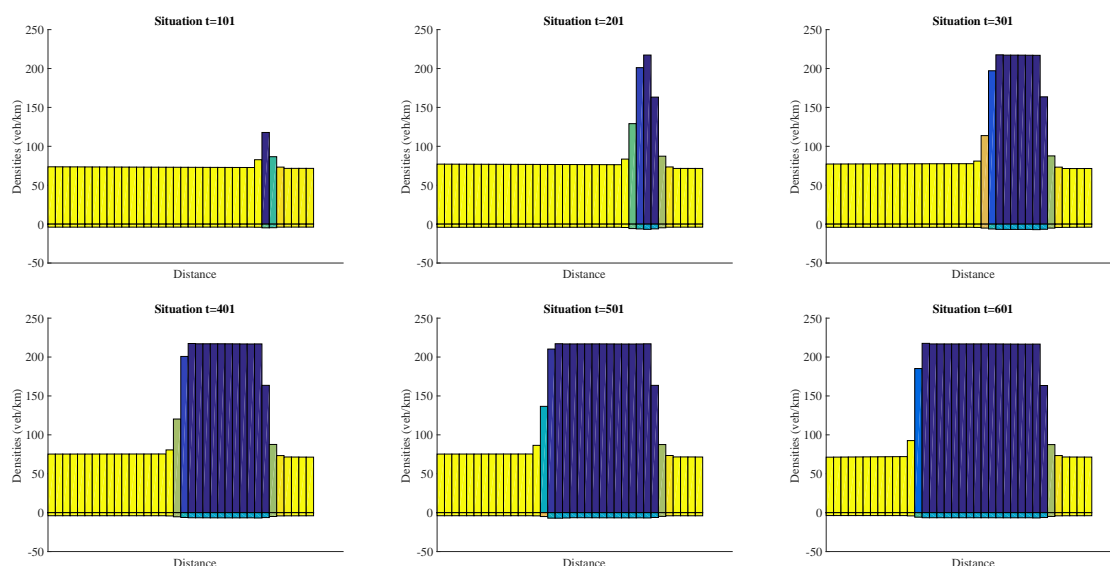
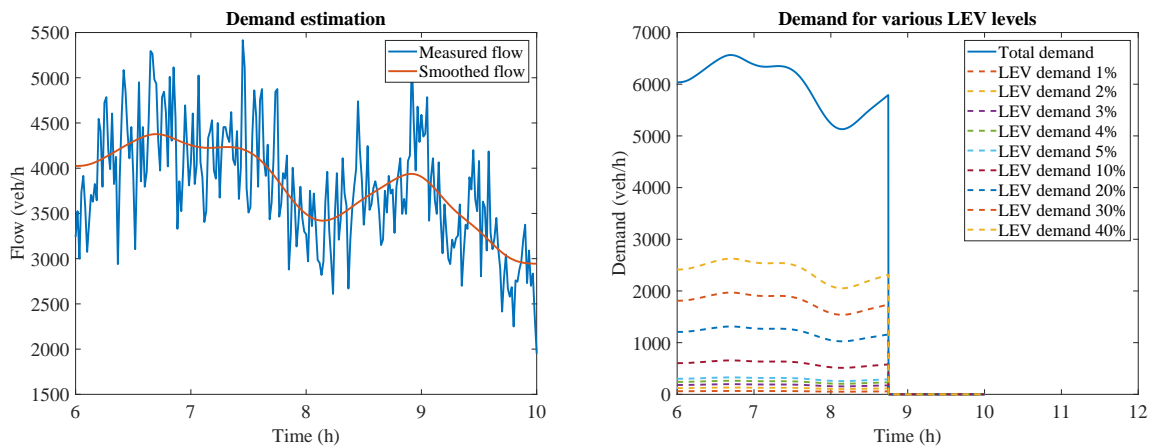


Figure 5: De situatie op de weg. De kleur geeft de snelheid aan en de hoogte van de balk de dichtheid. Merk op dat er voor auto's (boven de lijn  $y=0$ ) en LEVs (onder de lijn  $y=0$ ) twee verschillende balkjes zijn. Deze balkjes hebben in file ook een andere kleur, wat aangeeft dat de LEVs sneller door de file rijden dan de auto's.



## Case study

We nemen een versimpelde situatie, waarbij er een bottleneck is door een vermindering van het aantal stroken, van 4 naar 3. Het gemodelleerde stuk weg is 8km lang, en na 6400m is de bottleneck. Aan het begin van het wegstuk is er een vraagprofiel waarvoor een verkeersvraag gespecificeerd wordt (merk op dat in de verkeerskunde de “verkeersvraag” het aantal mensen is dat van de weg gebruik wil maken) Dit vraagprofiel is gebaseerd op de gemeten flow op de A4 in noordelijke richting tussen Delft en het Prins Clausplein. De vraag wordt op 0 gezet



(a) Gemeten intensiteit en gemodelleerde instroom

(b) Gemodelleerd vraagpatroon totaal en voor LEVs

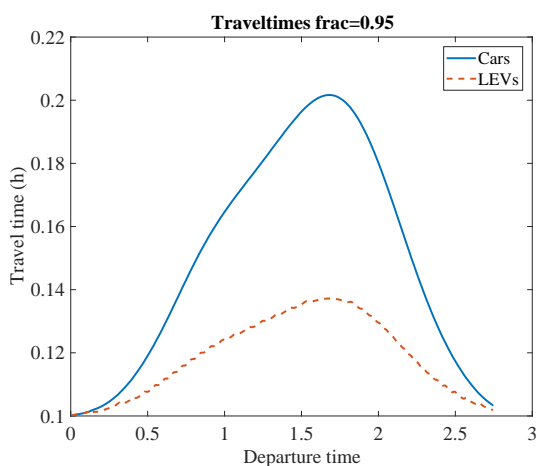
Figure 6: Gemeten intensiteit en gemodelleerde instroom

na het einde van de spits zodat de file leegloopt, en we een analyse kunnen uitvoeren met een gelijk aantal voertuigen. Deze vraag wordt geschaald zodat er een filepatroon ontstaat die past bij deze bottleneck (5 km file). Deze totale vraag, en het patroon over tijd, blijft gelijk voor de verschillende simulaties die we doen.

We simuleren deze situatie voor verschillende fracties van LEV verkeer, 0%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 10%, 20%, 30% en 40%. Een voorbeeld van de vraag over tijd voor een van de cases is te zien in figuur 6(b).

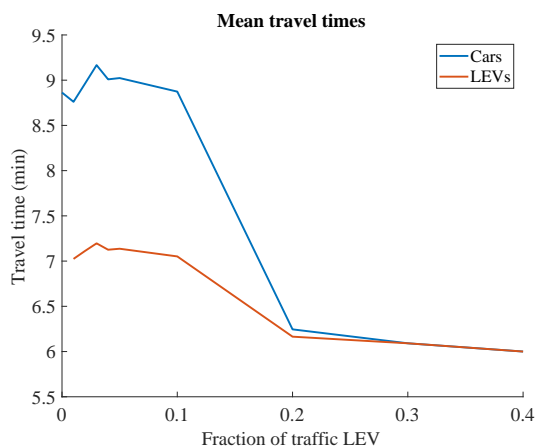
## Resultaten

De resultaten van snelheden in de verschillende kunnen we combineren Als resultaten krijgen we reistijd als functie van de vertrektijd voor beide klassen, alsmede de gemiddelde reistijd voor elk van de klassen. De reistijdfunctie ziet er voor lage fracties van LEVs typisch als volgt uit: Hierin zien we dat voor beide klassen de reistijd stijgt, maar voor auto's harder dan voor



LEVs.

Als de fractie LEVs verder stijgt, is het relatieve voordeel van LEVs ten opzichte van auto's – het tussen de stroken door kunnen rijden – verdwenen omdat er zo veel LEVs zijn dat de snelheid tussen de stroken even hoog is. Alles bij elkaar zien we de volgende resultaten voor wat betreft reistijd:



De reistijden kunnen we vermenigvuldigen met de aantallen auto's en LEVs om tot een totale reistijd te komen. Die totale reistijd is ook afhankelijk van de fractie LEVs. Dat is weergegeven in figuur 7(a). Die totale reistijd neemt af met de een toenemende fractie van

verkeer dat een LEV gebruikt. Als consequentie nemen ook de totale kosten toe van het verkeer. We gaan uit van een kostenequivalent van 15 euro per uur. De totale kosten nemen af indien meer mensen een LEV gaan rijden. In deze case study met ruim 10.000 euro in een ochtendspits op een weg in een richting.

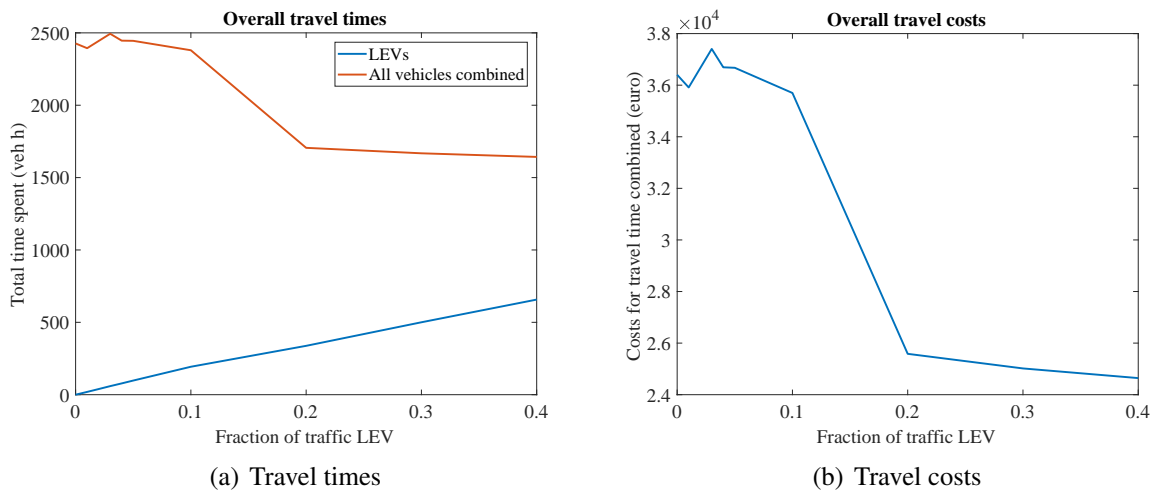


Figure 7: Gecombineerde reistijd en reiskosten

## Conclusies

In deze studie hebben we het effect van smalle voertuigen op de reistijd onderzocht. We hebben expliciet gekeken naar hoe de verkeersstroom zich gedraagt bij verschillende hoeveelheden verkeer van verschillende klassen. Daarbij is rekening gehouden met dat LEVs in sommige situaties wél en in sommige situaties níet tussen de overige stroken door kunnen rijden.

We komen tot de volgende bevindingen:

1. Kleine LEV fracties zorgen voor een significante toename van capaciteit.
2. Weggebruikers hebben zelf een reistijdwinst bij het overstappen van auto naar een LEV.
3. De reistijdwinst voor zowel de individuele “overstapper” als voor het overige verkeer is het grootst bij beperkte fractie LEVs.
4. Bij de case verdwijnt de file als circa 20% van de voertuigen een LEV zou zijn.

Tot slot een aantal overwegingen die de vraag overstijgen. Dit rapport heeft de mogelijke tijdsinstellingen benaderd van een theoretische overweging. Het zou goed zijn bijvoorbeeld de aannames over de snelheden in en tussen de file na te gaan met empirisch onderzoek. In

het huidige verkeersbeeld zou dat mogelijk zijn met motorfietsen en auto's. Analyses van het gebruik (wie kiest er voor een LEV), parkeermogelijkheden, en veiligheid zouden andere relevante dimensies kunnen zijn. Tot slot een suggestie voor een mogelijke aanvullende waarde van LEVs. Recent heeft een publicatie de waarde van "relative flow data" aangetoond (van Erp et al., 2019). Wat hiermee bedoeld wordt is dat auto's (of LEVs) bijhouden hoe vaak ze andere auto's inhalen of ingehaald worden. Dat is mogelijk met sensoren die nu al in auto's ingebouwd worden. Deze data bieden veel mogelijkheden om verkeerstoestanden (met files, reistijden en intensiteiten) te schatten. In het bijzonder werkt het goed als er ook voertuigen met verschillende snelheden rijden. In dat kader kan de informatie verzameld door LEVs een belangrijke bijdrage bieden, en kunnen LEVs helpen bij verkeersmonitoring.

# Bibliography

- C. F. Daganzo. *Fundamentals of Transportation and Traffic Operations*. Pergamon, 1997.
- Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid. *Mobiliteitsbeeld*. Technical report, 2019.
- Paul BC van Erp, Victor L Knoop, and Serge P Hoogendoorn. On the value of relative flow data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2019.
- I. Yperman. *Pendelen per motorfiets: een impact-analyse*. Technical report, Transport & Mobility Leuven, 2011.