

Nationaal verkeerskundecongres 2014

Invloed van invoegstroom en wegvaklengte op capaciteit

Natascha Kijk in de Vegte
(*Transpute*)

Jaap van Toorenborg
(*Transpute*)

Samenvatting

De vigerende opvatting is dat de capaciteit op een snelweg kleiner is naarmate de hoeveelheid invoegend (en uitvoegend) verkeer toeneemt. De turbulentie neemt immers toe. Een recent onderzoek dat Transpute heeft uitgevoerd in opdracht van Rijkswaterstaat-WVL wijst erop dat dit voor tweestrooksrijbanen juist niet het geval is. Integendeel, een grote invoegende stroom heeft een verhogend effect op de doorstroomcapaciteit. Opvallend was ook de uitkomst dat de *lengte* van het wegvak een krachtige invloedsfactor blijkt: hoe langer het wegvak, hoe geringer de capaciteit. Dit stelt de vraag ter discussie of de capaciteit wel een kenmerk is dat aan een wegdoorsnede gehecht mag worden, tot op heden een zo vanzelfsprekend uitgangspunt dat de wegvaklengte bij ons weten nooit eerder als invloedsfactor is onderzocht.

Trefwoorden

Capaciteit, autosnelweg, statisch model, wegvaklengte, invoegend verkeer

Inleiding

Wanneer het aankomt op de capaciteit van wegen zijn er, ondanks talrijke onderzoeken, nog veel onbegrepen zaken. Anders gesteld: het blijkt bijzonder lastig op voorhand te stellen wat de capaciteit van een wegvak zal blijken te zijn. Onderzoeksresultaten zijn gewikt en gewogen en op basis daarvan zijn richtwaarden opgesteld (zie bv. CIA). Kijkt men echter in het veld naar de werkelijke waarden zoals die optreden bij knelpunten, dan zijn verschillen in de orde van 10% allermindst een uitzondering. In een verkeersmodel tellen niet alleen de capaciteiten op knelpuntlocaties, maar kan een verkeerde capaciteit op elk wegvak de uitkomst ontregelen. In een model worden de wegvakcapaciteiten afgeleid uit de wegconfiguratie volgens een aantal expliciete, afgesproken regels. Het is dus de kunst om met richtwaarden en inachtnaam van de belangrijkste invloedsfactoren met die regels voor elk wegvak op een realistische waarde uit te komen. En realistische waarden zijn nodig, zonder dat zal het nooit lukken de verkeersafwikkeling naar werkelijkheid te modelleren. Ziedaar de capaciteitswaardenpuzzel waar elk verkeersmodel mee kampt. Aanleiding om opnieuw naar de capaciteitsregels in het landelijk modelsysteem (LMS/NRM) te kijken was het project 'Verbetering reistijden Qblok' (Qblok is de dynamische component van het LMS/NRM) waarin Rijkswaterstaat laat onderzoeken of het mogelijk is de modellering van de reistijden in de modellen te verbeteren. Daarbij is door Transpute onderzocht of en hoe de capaciteitsmodellering in het model verbeterd kon worden. Om te beginnen zijn daartoe de veldwaarden bij bestaande knelpunten tegen het licht gehouden en is getracht om die, uitgaande van de richtwaarden en gebruikmakend van enkele invloedsfactoren, zo dicht mogelijk te benaderen. De resultaten waren verrassend: tegen de verwachting in blijkt de invoegende stroom een positief effect op de capaciteit te hebben. Dus hoe groter de invoegende stroom, hoe hoger de capaciteit. De lengte van het wegvak daarentegen heeft een negatief effect: hoe langer het wegvak, hoe lager de capaciteit.

In dit paper beschrijven we het onderzoek naar verbeterde capaciteitsregels. Allereerst wordt op de o.i. belangrijkste verklarende factoren voor capaciteit ingegaan. Vervolgens wordt toegelicht welke veldwaarden zijn verzameld en hoe de afzonderlijke factoren met de gemeten capaciteit samenhangen. M.b.v. een meervoudige regressie-analyse wordt een nieuwe benaderingsformule voor de capaciteit afgeleid.

1. Verklarende factoren

In het kader van genoemd project zijn veldwaarden opgemeten van de capaciteit bij bestaande, structurele knelpunten, en zijn tevens van deze locaties een aantal weg- en verkeerskenmerken verzameld om op hun verklarende kracht te kunnen worden onderzocht. De meegenomen kenmerken waren:

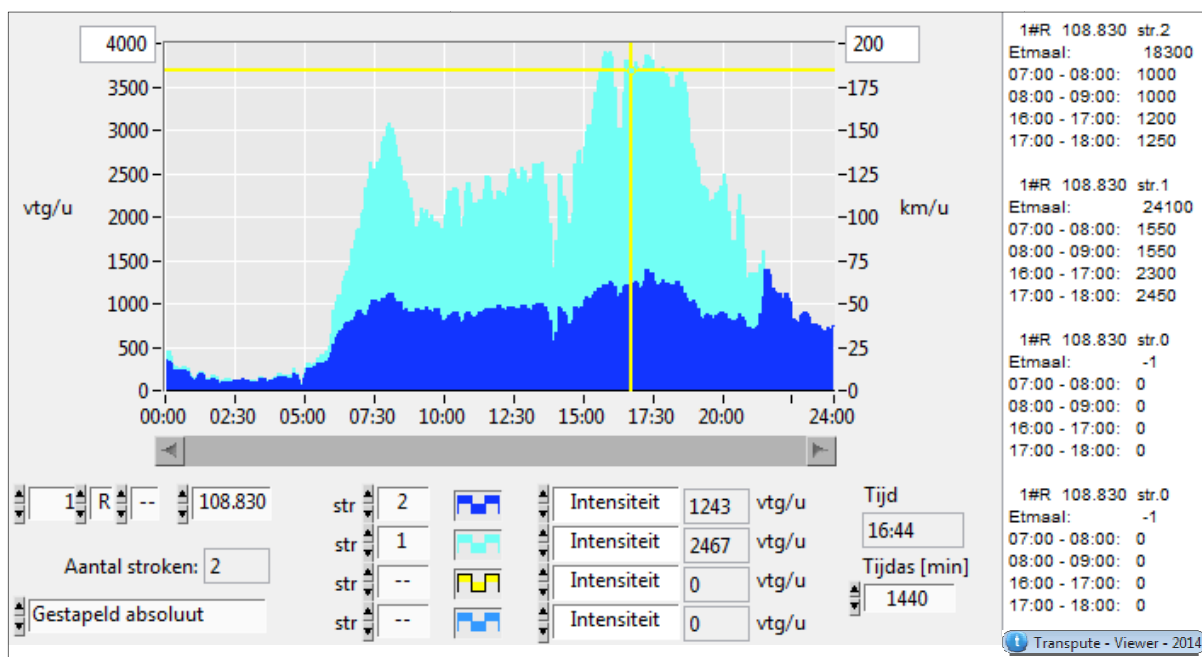
- aantal rijstroken
- ochtend- of avondspits
- de grootte van de invoegende stroom (op de toerit dan wel de invoegende rijbaan)
- hoeveelheid vrachtverkeer (tijdens de spits),
- type discontinuïteit: wegversmalling / toerit dan wel samenvoeging / weefvak
- de lengte van het wegvak

De eerste vijf spreken waarschijnlijk voor zich. De laatste lichten we nader toe.

De lengte van het wegvak

Waarom de lengte van het wegvak meenemen als verklarende factor? Een file begint vrijwel altijd tussen 1 à 2 km na de invoeger, dus wat zou de verdere lengte voor invloed hebben? De ervaring van Transpute is dat hoge capaciteiten alleen op korte wegvakken worden gehaald en lage capaciteiten voornamelijk op langere trajecten. Een lengte-effect op de eerste 2 km is verklaarbaar door te bedenken dat, eer het verkeer tot filevorming komt, er al weer een afrit of splitsing is. Dat lange vakken toch een reducerend effect hebben kan worden begrepen vanuit de gedachte dat verkeer anticipeert op dit gegeven. Personenautobestuurders willen niet graag langdurig tussen het vrachtverkeer zitten. Op een lang vak zullen ze dus meer de rechter rijstrook mijden. Met als gevolg (de welbekende) leegtes tussen de vrachtwagens op de rechter rijstrook. In het extreme geval is de linker rijstrook alleen gevuld met personenauto's en wordt de rechter alleen gebruikt door het vrachtverkeer. Er ontstaat in dit geval al file op het moment dat de linker rijstrook vol raakt, terwijl de rechter rijstrook nog ruimte heeft, zie fig. 1.

Fig. 1: Intensiteit op de A1 bij Deventer-Oost, meetlocatie na het einde van de spitsstrook. De file staat in de avondspits. In de tabel naast de grafiek staan de uurintensiteiten in de spitsperiodes. Op de linker rijstrook (rijstrook 1, lichtblauw), rijdt twee keer zoveel verkeer als op de rechter rijstrook (rijstrook 2, donkerblauw). Op de rechter rijstrook rijden circa 1200 vtg/u (waarvan ongeveer 750 vrachtauto's).



Zodra er weer ruimte komt, door een extra strook of door een zware afrit, gaat de druk er vanaf en is het effect afgelopen. Bij een lichte aansluiting treedt dit effect minder op en zou het volgende wegvak dus misschien opgeteld moeten worden bij de wegvaklengte. Invoeren van een dergelijk effect in het LMS-netwerk is dit lastig omdat de stromen niet a-priori bekend zijn. Over hoe de lengte van het wegvak gedefinieerd moet worden om de beschreven effecten te vangen, is dus discussie mogelijk. Bedoeld is vanaf de plek waar de file gemaakt wordt tot de plek waar voor het gevoel van de verkeersdeelnemer weer ruimte ontstaat. We hebben het hier eenvoudig gehouden: het vak tussen de twee discontinuïteiten, dus de afstand van een toerit of een

rijbaanversmalling naar de volgende afrit of splitsing, verzorgingsplaatsen niet meegerekend.

Noot: We hebben een vermoeden dat ook de lengte van het stroomopwaartse vak invloed heeft i.v.m. de looptijd van filegolven naar de volgende aansluiting. Een vluchtige inspectie deed dit effect er niet direct uitspringen, en om de zaak niet verder te compliceren is het niet meegenomen.

Daarom is besloten eerst alleen het knelpuntsvak zelf te nemen, d.w.z. het wegvak tussen twee discontinuïteiten.

2. Verzamelen veldwaarden

De genoemde grootheden zijn vervolgens verzameld uit meetcijfers. Hiervoor zijn vrijwel alle structurele knelpunten uit 2010 geïnspecteerd. Uit praktische overwegingen is ervoor gekozen om de analyse te baseren op meetcijfers uit 2010¹. Enerzijds omdat eerst is gekeken welke filelocaties in het NRM (basisjaar 2010) ontbraken of niet juist waren, anderzijds omdat voor 2010 al een overzicht van knelpuntlocaties beschikbaar was vanuit een ander project. De meetcijfers komen uit Monica, alleen voor het vrachtverkeer is gebruik gemaakt van NDW en INWEVA.

Allereerst is de capaciteit van de knelpunten bepaald. Vervolgens zijn van de knelpunten waarvoor capaciteitsbepaling mogelijk was, de overige factoren verzameld.

Methodiek capaciteitsbepaling

Van de knelpunten is de capaciteit bepaald door de *uitstroom uit de kop van de file*² te bepalen. Deze waarde is als de *capaciteitsgrootte* beschouwd die het model zou moeten hanteren, d.w.z. het plafond aan de doorstroming op een vak gedurende de tijd dat er file door dit vak wordt gemaakt.

Er is gebruik gemaakt van jaargemiddelde waarden. Dit is een grove benadering, maar in dit onderzoek goed genoeg. Enerzijds omdat er naar structurele filelocaties gekeken wordt waar vrijwel dagelijks file staat.

Anderzijds omdat er in het LMS en het NRM met jaargemiddelden wordt gerekend.

Ter controle zijn enkele dagen geïnspecteerd om te zien of de capaciteitswaarde stabiel is dan wel sterk variabel.

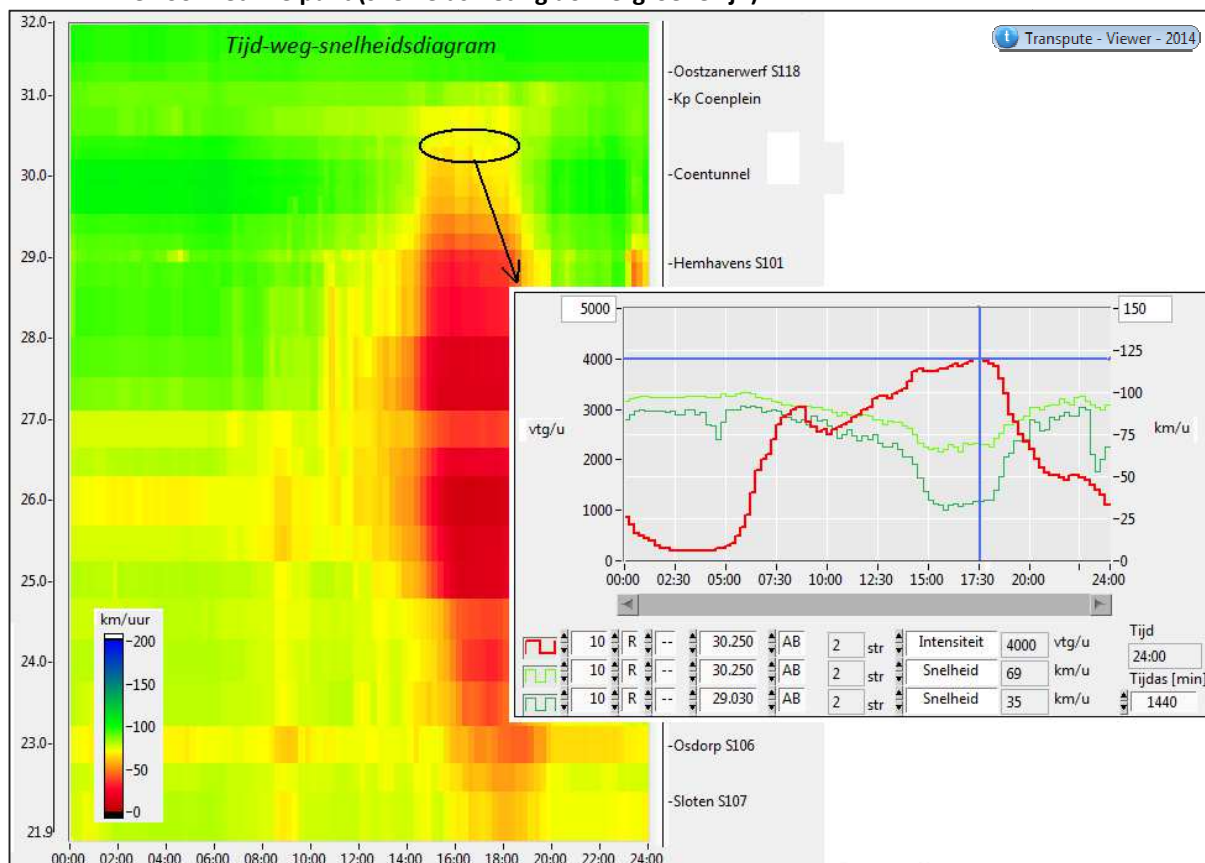
De bepaling van de jaargemiddelde waarde heeft 'op het oog' plaatsgevonden door het plateau in de doorstroming te bepalen (zie fig. 2). Hierbij is ervoor gewaakt dat de periode waarover het intensiteitsprofiel is gemaakt niet een grote verkeerstechnische overgang bevat (als de opening van een spitsstrook, groot onderhoud e.d.) en dat capaciteitsmetingen niet werden verstoord door fileterugslag van stroomafwaartse knelpunten.

Dit leverde een lijst van 38 analyseerbare knelpunten op: 24 op tweestrooks rijbanen en 13 op driestrooks rijbanen.

¹ In enkele gevallen zijn cijfers uit 2011 of 2012 genomen als op basis van 2010-data geen goede capaciteitsmeting kon worden gedaan. De meetbron is MONICA, voor het bepalen van hoeveelheid vrachtverkeer is gebruik gemaakt van NDW en INWEVA 2012.

² in een tweecapaciteitenregime is het dus de laagste waarde. Soms is het zo dat in de aanloop naar file inderdaad wat hogere doorstroming wordt waargenomen. Omdat dit dagelijks op een wat variabel tijdstip plaatsvindt, valt dit in een jaargemiddeld intensiteitsprofiel vaak nauwelijks meer op. Was er wel een verhoging aan het begin van de spits, dan is toch de hoogte van het plateau na de piek als waarde voor de capaciteit genomen.

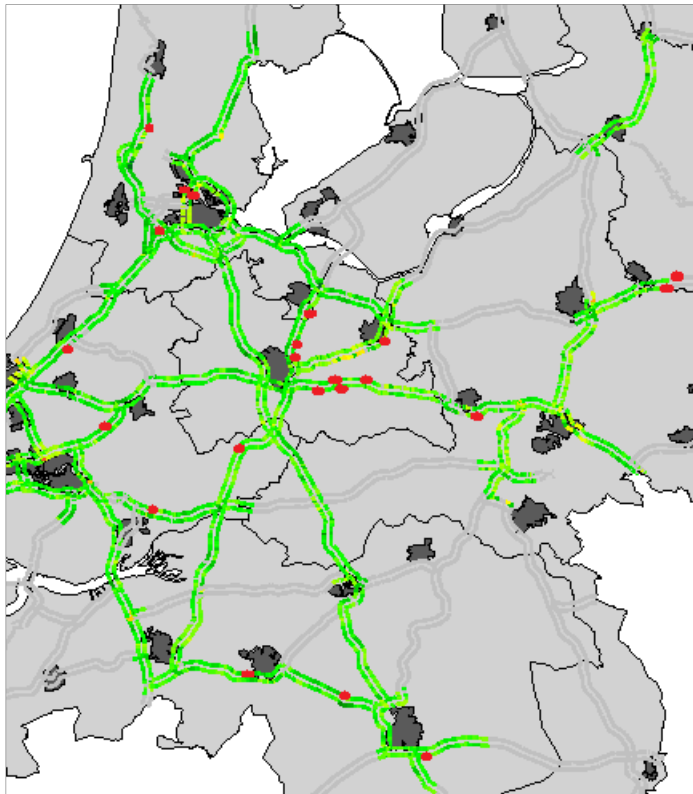
Fig. 2: Deze figuur illustreert de methodiek die is gevolgd voor de capaciteitsbepaling. De locatie van de kopfile is bepaald m.b.v. een (jaargemiddeld) tijd-weg-snelheidsdiagram. Vervolgens is op deze locatie uit de intensiteitsgrafiek (rode lijn) de maximale jaargemiddelde uitstroom afgelezen (blauwe kruisdraad). Voorwaarden hierbij: geen file op de uitstroom locatie (zie snelheidsmeting lichtgroene lijn) en wel file vóór het knelpunt (snelheidsmeting donkergroene lijn).



3. Verkenning: effecten per invloedsfactor

Omdat in ieder geval de invloed van vrachtverkeer sterk verschilt bij (een-,) twee- of driestrooksrijbanen [1] en voor de andere factoren waarschijnlijk hetzelfde geldt, zijn de twee- en driestrooks wegen apart onderzocht. Daarbij speelde het verschil in aantal parten: de 24 tweestrookscapaciteiten lieten zich veel beter tot de invloedsfactoren herleiden dan de 13 driestrookslocaties. Daarom wordt in dit paper voornamelijk ingegaan op de tweestrooks rijbanen. Deze locaties zijn weergegeven in het kaartbeeld, hun signatuur in tabel 1.

Fig. 3: Onderzoekslocaties op tweestrooks rijbanen



De knelpunten Sliedrecht-West en Moordrecht zijn twee keer meegenomen, omdat deze zowel in de ochtend- als in de avondspits file maken en in beide spitsen een goede meting kon worden gedaan. Dit aantal was te weinig om een eventueel capaciteitsverschil tussen ochtend- en avondspits (bijv. door een andere samenstelling van verkeer) te herleiden.

Voor tweestrooks wegen blijven dan de volgende verklarende variabelen over: grootte van de invoegende stroom, hoeveelheid vrachtverkeer, type discontinuïteit en de lengte van het wegvak. Eerst zijn de effecten per invloedfactor onderzocht en is gekeken wat de correlaties tussen de verschillende variabelen waren. Vervolgens is het simultane verband van de verklarende variabelen op de capaciteit onderzocht met een meervoudige regressie-analyse.

Tabel 1: Onderzoekslocaties op tweestrooksrijbanen

<i>Knelpunt</i>	<i>Omschrijving</i>
A10L Coentunnel	samenvoeging, tunnel, vast knelpunt
A10R Coentunnel	invoeger, tunnel, vast knelpunt
A12L Driebergen	invoeger, start filegolfttraject
A12L Maarn	invoeger, start filegolfttraject
A12R Bunnik	invoeger, vast knelpunt
A12R Driebergen	invoeger, start filegolfttraject
A12R Wageningen ri. Arnhem	afstreping links (einde spitsstr.), vast knelpunt
A15L Sliedrecht-W	invoeger, vast knelpunt
A1L Bathmen	invoeger, start filegolfttraject
A1R Deventer einde spitsstrook	afstreping links (einde spitsstr. kort na invoeger), vast knelpunt
A20L Moordrecht	invoeger, vast knelpunt

<i>Knelpunt</i>	<i>Omschrijving</i>
A27L Lexmond	soms invoeger, soms afstreping links, vast knelpunt
A27R Bilthoven	invoeger, vast knelpunt
A27R Hilversum	invoeger, vast knelpunt
A27R Utrecht-Noord	invoeger, vast knelpunt
A28R Leusden 7	invoeger, vast knelpunt
A4L Zoeterwoude ri. A'dam	afstreping links, filegolven
A58R Goirle - St. Annabosch	afstreping links (kort na invoeger), vast knelpunt
A58R Oirschot	invoeger, start filegolfttraject
A67R kp.Leenderheide - Geldrop	samenvoeging HR+PR, vast knelpunt
A9L Raasdorp ri. Badh.drp	afstreping links, vast knelpunt
A9R toerit Castricum ri. Alkmaar	afstreping links (kort na invoeger), vast knelpunt

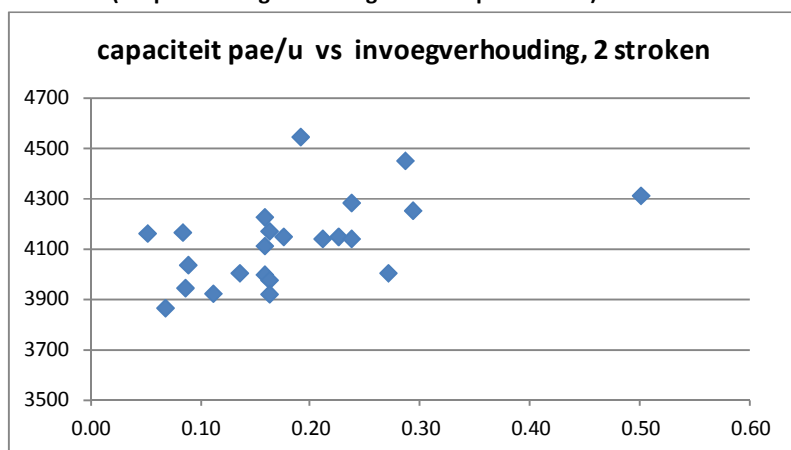
Grootte van de invoegende stroom

Op de knelpuntslocaties zijn behalve de capaciteit ook de intensiteiten van de twee samenkomende stromen gemeten, tijdens file. In fig. 4 is de invoegverhouding (verhouding tussen invoegende stroom en totale stroom) uitgezet tegen de capaciteit in pae/u om de invloed van het vrachtverkeer te elimineren. Capaciteit is de uitstroom uit de file, dus nadat de invoeger erbij is gevoegd. Elk punt vertegenwoordigt een onderzoekslocatie, dus een tweestrooks wegvak dat structureel file veroorzaakt.

De puntenwolk vertoont een licht positief verband tussen invoegverhouding en capaciteit. Dus hoe groter de invoegende stroom, hoe groter de capaciteit. Een mogelijke verklaring is dat het wegvak dat file maakt (tijdens file) beter wordt gevuld als de invoegende stroom groter is. Vergelijk het met weggrijden bij een verkeerslicht. Op een enkelstrooks weg liggen er bij VRI's vaak twee opstelstroken voor het rechtdoorgaande verkeer. Na de kruising gaat de weg weer terug naar één. In deze situatie kunnen de sneller optrekkende voertuigen de langzamere inhalen, met als gevolg dat de gaten die de langzame voertuigen laten vallen tijdens het optrekken direct worden opgevuld. Was er slechts één opstelstrook geweest, dan werd de weg minder goed benut omdat dan de gaten in de verkeersstroom niet meteen worden opgevuld.

Deze bevinding geldt dus voor filesituaties, d.w.z. voor de capaciteit die gemiddeld tijdens de spits wordt gehaald. Dit is de situatie die het model moet representeren. Het zegt niets over het startpunt van de file, waarbij de capaciteit soms hoger ligt (twee-capaciteiten regime).

Fig. 4: Invoegverhouding uitgezet tegen capaciteit (pae/u)
(elk punt vertegenwoordigt een knelpuntlocatie)



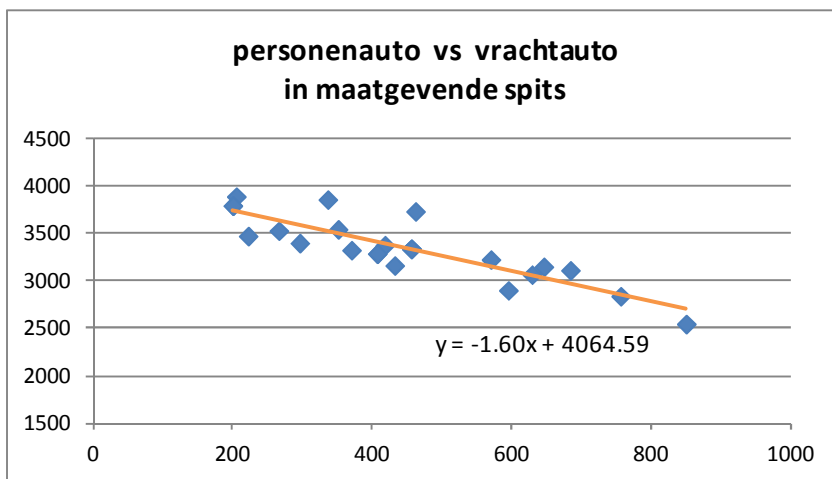
Hoeveelheid vrachtverkeer

De hoeveelheid vrachtverkeer is bepaald tijdens de spits waarin de capaciteit gemeten is. De grafiek, afgebeeld in fig. 5 toont de relatie tussen personenauto's en vrachtauto's.

De grafiek laat een lineair verband zien tussen het aantal personenauto's en het aantal vrachtauto's in het knelpunt.

De fitlijn geeft een indicatie van de hoogte van de pae-factor. Uitgaande van een standaard waarde voor de capaciteit, geeft de richtingscoëfficiënt van de fitlijn aan met welke factor een vrachtauto vermenigvuldigd moet worden om opgeteld bij het aantal personenauto's tot die capaciteit te komen. De coëfficiënt van de fitlijn is $-1,6$. Dit geeft aan dat de momenteel toegepaste pae-factor van 1,75 mogelijk iets aan de hoge kant is.

Fig. 5: Hoeveelheid vrachtverkeer uitgezet tegen het aantal personenauto's, tijdens file.
(elk punt vertegenwoordigt een knelpuntlocatie)



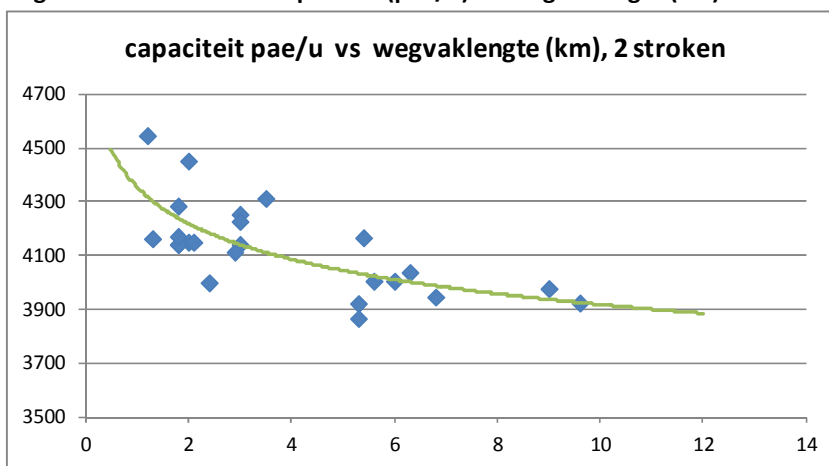
Lengte van het wegvak

Tenslotte de lengte van het wegvak. Dit is de lengte van de knelpunt veroorzakende discontinuïteit naar de volgende discontinuïteit, dus bijvoorbeeld de lengte van toerit naar afrit.

De puntenwolk suggereert een afnemend, maar niet-lineair verband. De capaciteit staat weer in pae/u om de invloed van het vrachtaandeel te elimineren.

Het lengte-effect is onmiskenbaar aanwezig, maar ook nog met zeer veel strooiing bij de kortere vakken. Met een machtsfunctie viel het redelijk te benaderen, zie de trendcurve in fig. 6.

Fig. 6: Verband tussen capaciteit (pae/u) en wegvaklengte (km), 2 stroken



Type discontinuïteit

De dataset voor tweestrooks wegen bevat 2 typen discontinuïteiten: invoegers (18x) en rijbaanversmallingen (6x). Onder de groep invoegers vallen ook samenvoegingen van rijbanen in knooppunten. Dit waren samenvoegingen van twee 2-strooks rijbanen waarvan een van beide eerst teruggebracht werd naar 1 rijstrook om vervolgens in te voegen via een invoegstrook en kunnen daarom gezien worden als invoegingen. De rijbaanversmallingen betreffen afstrepingen van links.

De gemiddelde capaciteit van knelpunten bij invoegers bedraagt 4130 en van samenvoegingen 4110, m.a.w. dit verschil is niet noemenswaardig.

Samenvattend: De grootte van de invoegende stroom lijkt dus een positief effect op de capaciteit te hebben en de wegvaklengte heeft een reducerend effect. Ook de hoeveelheid vrachtverkeer werkt negatief mee. Het type discontinuïteit lijkt geen verklarende variabele te zijn.

4. Statistische uitwerking - opstellen capaciteitsformule voor tweestrooks rijbanen

In de voorgaande paragraaf is het verband tussen capaciteit en de verklarende variabelen afzonderlijk bekeken. Geen van de variabelen kan op zichzelf de variatie in capaciteit verklaren. Met behulp van een meervoudige lineaire regressie-analyse is nagegaan of de variabelen in combinatie een betere voorspeller zijn.

Bij het uitvoeren van een meervoudige lineaire regressie wordt een lineair verband verondersteld tussen de variabelen. De invoegverhouding en hoeveelheid vrachtverkeer toonden een lineair verband met capaciteit. Het effect van wegvaklengte op capaciteit was echter niet lineair. Daarom is deze variabele eerst lineair gemaakt.

Wegvaklengte lineair maken

Het hierboven getoonde verband tussen wegvaklengte en capaciteit is omgeschreven naar een lineair verband, waarin niet de lengte zelf maar een *lengtefactor* de verklarende variabele in het capaciteitsmodel wordt. Daarnaast moet de capaciteit bij oneindig lange vakken niet naar 0 gaan, maar naar een asymptoot. Immers, aangenomen mag worden dat de minimale capaciteit van een tweestrooks wegvak ruim boven nul ligt. We hebben daarom onderstaande formule toegepast:

$$Lfactor = 0,75 + 0,25 * \exp[-\max\{0, (L - Lmin)/Lh\}]$$

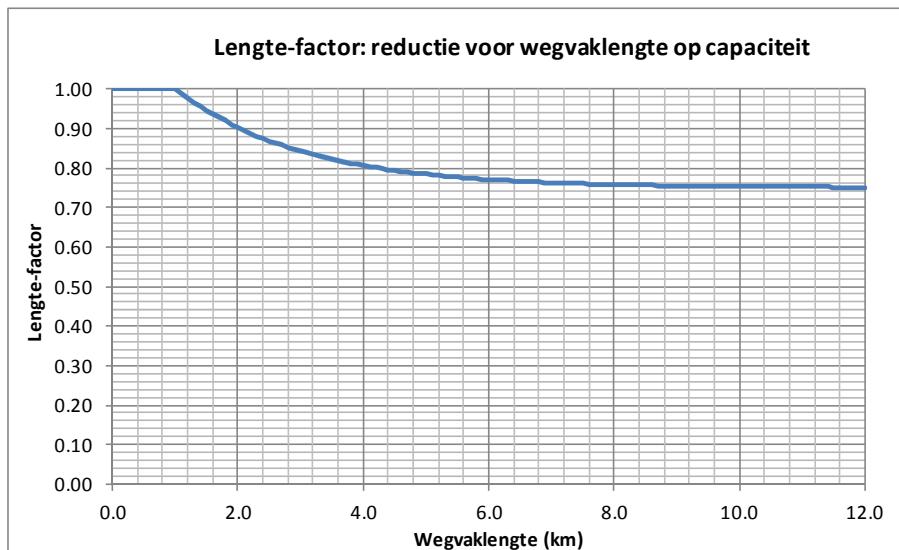
Toelichting:

- De asymptoot (0,75) is gebaseerd op de gedachte dat de uitstroom uit filegolven de laagste capaciteit van een weg benadert. Deze uitstroom bedraagt ongeveer $\frac{3}{4}$ van de capaciteit van een kort wegvak [2]. In het slechtste geval van een oneindig lang wegvak waarop een filegolf zich beweegt, is dit dus de eindcapaciteit.
- De exponent vertegenwoordigt het waargenomen machtreeksverband.
- Lmin (1 km) vertegenwoordigt een minimale lengte; vakken korter dan Lmin krijgen niet meer een hogere capaciteit. Bij een vaklengte van 1 km of korter bedraagt de lengte-factor dus 1, en heeft in dat geval geen reducerend effect op de capaciteit³.
- Lh is een schaalfactor en is gezet op 2 om zo dicht mogelijk bij het gevonden verband uit de metingen te blijven.

In grafiekvorm ziet dit er uit als weergegeven in figuur 7.

³ Interessant is de vraag wat er gebeurt bij wegvakken, korter dan 1 km. Omdat datapunten ontbreken is het momenteel niet empirisch onderzoekbaar. In de formule is afvangen nodig (geen vreemd-grote capaciteitsmodelwaarden bij zeer korte vakken).

Fig. 7: Analytisch verloop van de gepostuleerde Lengte-factor als invloedsfactor in de regressieanalyse



Met deze formule ontstaat een hanteerbare invloedsfactor voor de lengte van het wegvaklengte die in een regressiemodel kan worden meegenomen op gelijke voet met vrachtpercentage en invoegverhouding.

Onderzoeken correlatie tussen variabelen

Vervolgens is onderzocht in hoeverre de verklarende variabelen onderling correleerden. De correlaties tussen de variabelen zijn in onderstaande tabel gegeven.

Tabel 2: Correlatie tussen verklarende variabelen en capaciteit

	capaciteit	inv.verh	#vracht	Lfactor	type
capaciteit	1				
inv.verh	0.47	1			
#vracht	0.16	-0.01	1		
Lfactor	0.69	0.18	-0.17	1	
type	-0.06	-0.31	0.13	-0.17	1

De lengte-factor en de invoegverhouding zijn het meest verklarend voor de capaciteit in pae/u. Het aandeel vrachtverkeer heeft nog een lichte correlatie met de capaciteit in pae/u. Dit duidt erop dat de gehanteerde pae-factor (1,75) nog niet exact de relatie tussen de capaciteit in mvt en in pae beschrijft. Het type discontinuïteit is nauwelijks verklarend voor de capaciteit. Dit strookt met de constatering dat de gemiddelde capaciteiten van beide typen vrijwel gelijk waren.

De onderlinge correlaties tussen de invoegverhouding, hoeveelheid vrachtverkeer en lengte-factor zijn gering.

Met de drie variabelen invoegverhouding, hoeveelheid vrachtverkeer en lengte-factor is een meervoudige lineaire regressie uitgevoerd⁴.

Elimineren variabele vrachtverkeer

Wanneer de pae-factor een vaste waarde heeft en de juiste waarde ervan is toegepast, zou de regressie-analyse een coëfficiënt opleveren voor het vrachtverkeer met waarde 0. In dat geval kan de hoeveelheid vrachtverkeer uit de capaciteitsformule gelaten worden en blijven er slechts twee variabelen over. Dit is als volgt onderzocht.

Aangezien er aanwijzingen zijn dat de pae-factor van 1,75 aan de hoge kant is, is eerst de regressie-analyse uitgevoerd waarbij de capaciteit in pae was berekend met een pae-factor van 1. De coëfficiënt voor het vrachtverkeer kwam hierbij uit op -0,5. Doorvertaald naar een pae-factor levert dit de waarde 1,5. Vervolgens is nogmaals een regressie-analyse uitgevoerd, waarbij voor de capaciteit een pae-factor van 1,5 is gehanteerd. De coëfficiënt voor het vrachtverkeer kwam nu inderdaad uit op nul. Met andere woorden: wanneer een pae-factor van 1,5 wordt gehanteerd, kan het effect van de hoeveelheid vrachtverkeer uit het capaciteitsmodel gelaten worden. Alleen de lengte (lengte-factor) en de invoegverhouding blijven over.

Resultaat capaciteitsmodel tweestrooks wegen

De regressie-analyse (zie kader voor de resultaten) voor de twee variabelen lengte-factor en invoegverhouding leverde de volgende formule voor de capaciteit op tweestrooks wegen:

$$\text{Capaciteit (pae/u)} = 2583 + 565 * \text{inv.verh} + 1579 * \text{Lfactor}$$

$$\text{Waarbij: Lfactor} = 0,75 + 0,25 * \exp[-\max\{0, (L - 1)/2\}]$$

Tabel 3: Resultaten regressie-analyse

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>
Intercept	2583	248	2068	3099
invoegverhouding	565	206	137	993
Lfactor	1579	297	962	2197

<i>Regression Statistics</i>	
Multiple R	0.82
R Square	0.67
Adjusted R Square	0.64
Standard Error	99
Observations	24

Met dit model wordt 67% van de variatie verklaard. De invoegverhouding draagt positief bij maar zit net boven 0 op 95%-niveau. De lengte-factor levert de grootste bijdrage aan de verklaring van de variatie. Desalniettemin is het 95%-interval rond de coëfficiënt nog +/- 40%.

De formule geeft de volgende uitkomsten:

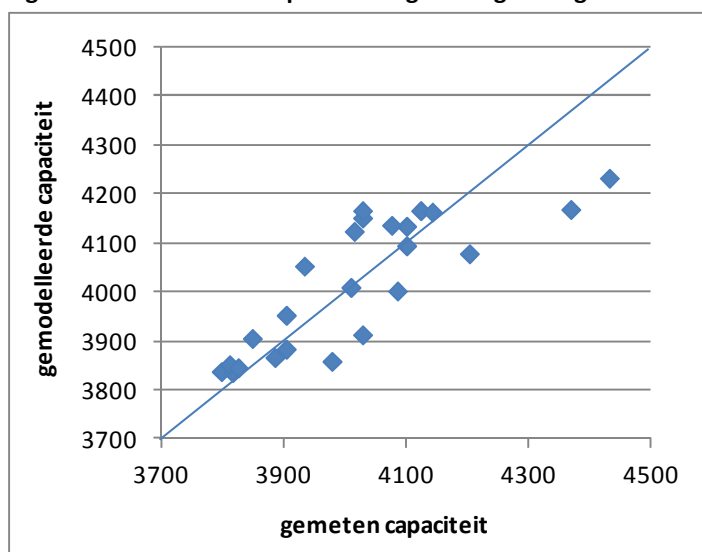
Een kort wegvak met een hoge invoegverhouding heeft een hoge capaciteit. Het knelpunt A20 toerit Moordrecht heeft een wegvaklengte van 1,8 km en een invoegverhouding van 0,24. De modelcapaciteit komt uit op 4167 pae/u. Had dit wegvak een lengte van 5 km gehad, dan zou de capaciteit uitkomen op 3956 pae/u.

⁴ In eerste instantie is ook de 4^e variabele 'type discontinuïteit' meegenomen. Deze bleek niet significant te zijn.

Een lang wegvak met een lage invoegverhouding heeft een lagere capaciteit. Het knelpunt A27 toert Bilthoven heeft een wegvaklengte van 5,3 km en een invoegverhouding van 0,07. De modelcapaciteit komt uit op 3853 pae/u. Was de wegvaklengte 2 km geweest, dan zou de capaciteit stijgen naar 4046 pae/u.

Als we nu de met de gevonden capaciteitsregel vastgestelde capaciteiten vergelijken met de veldwaarden, dan toont de grafiek in fig. 8 het resultaat. Uitgezet is de gemodelleerde capaciteit tegen de gemeten capaciteit. De fit is zeker niet volmaakt, maar duidelijk is dat een fors deel van de variatie wordt opgepikt.

Fig. 8: Gemodelleerde capaciteit uitgezet tegen de gemeten capaciteit



Het gevonden capaciteitsmodel voor tweestrooks wegen wordt op dit moment getest in het LMS. Alvorens tot invoering kan worden overgegaan zullen nog zeker een aantal checks en dubbelchecks moeten worden gedaan. Immers, de formule is uitgewerkt aan de hand van velddata op vigerende knelpunten, dus op de honderden andere locaties van het netwerk, waar de formule ook wordt toegepast, kunnen nog verrassingen optreden. Ook vraagt de capaciteit van weefvakken aandacht. Het streven is natuurlijk naar een verbetering, de resultaten van de test worden binnenkort verwacht.

5. Capaciteit voor driestrooks wegen

Eenzelfde analyse is uitgevoerd voor de driestrooks rijbanen. M.a.w. op de drie variabelen invoegverhouding, wegvaklengte en hoeveelheid vrachtverkeer is een regressie-analyse uitgevoerd. Slechts 44% van de variatie in capaciteiten werd met deze drie variabelen verklaard (tegen 67% bij de tweestrooksrijbanen). Er wordt dus nog iets gemist, al weten we op dit moment niet wat. Doordat ook nog eens het aantal datapunten binnen deze groep een stuk kleiner was (13 tegen 24), vielen de verbanden die naar boven kwamen statistisch niet hard te maken. Desondanks noemen we de conclusies, omdat ze tot nadenken stemmen.

Uit de analyse van capaciteiten op driestrooksrijbanen kwamen de volgende verbanden naar boven:

- Wegvaklengte geeft een licht dalend verband met capaciteit, maar in tegenstelling tot de tweestrooks rijbanen is het verband hier wel lineair. Er hoeft dus geen lengte-factor te worden geïntroduceerd.

- Invoegverhouding heeft een negatief verband met capaciteit. Dit in tegenstelling tot tweestrooks rijbanen waar een positief verband werd gevonden.
- In de dataset zijn de beide verklarende variabelen sterk gecorreleerd. Kennelijk hangen lange vakken overwegend samen met grote invoegende stromen en vice versa. Dit maakt interpretatie van de regressie-analyse lastig. Door uitwisseling van coëfficiënten kan namelijk een min of meer vergelijkbaar capaciteitseffect worden verkregen door alles over de boeg van de wegvaklengte te gooien dan wel, omgekeerd, over de boeg van de invoegverhouding.
- Met een pae-factor van 1,5 wordt de invloed van het vrachtverkeer overschat. Zelfs wanneer de pae-factor wordt verlaagd tot 1, dus een vrachtauto gelijk te stellen aan een personenauto, bestaat er een positief verband tussen hoeveelheid vracht en capaciteit. M.a.w. hoe meer vrachtverkeer, hoe meer capaciteit.

De gevonden coëfficiënten voor wegvaklengte en invoegverhouding zijn elk voor zich niet significant. Hooguit kan een gezamenlijk effect worden opgesteld (gezien de onderlinge correlatie van deze variabelen). Nader onderzoek is hier nodig.

De invloed van het vrachtverkeer verdient nadere overdenking. Kennelijk zijn er situaties waarbij vrachtauto's gaatjes vullen die de personenauto's laten liggen. Als personenautobestuurders niet tussen de vrachtwagens willen zitten, en de rechter rijstrook is nog niet vol, dan krijgen extra vrachtwagens bij wijze van spreken een vrijkaartje, dat zou zo'n situatie kunnen zijn. Voor de toepassing in verkeersmodellen betekent de bevinding dat de verrekening van het vrachtverkeer, althans voor driestrooksrijbanen, op een andere leest moet worden geschoeid.

Vanuit onderzoeksoogpunt kan worden gesteld dat er aan interessante nieuwe inzichten is geroken, maar dat de maaltijd nog lang niet kan worden opgediend. Om de effecten voor driestrooks wegen geloofwaardig en consistent in model te brengen is in elk geval meer en nauwkeuriger veldmateriaal nodig. Wellicht kan ook de keuze van de verklarende variabelen verbeterd worden. En theorievorming, bijvoorbeeld m.b.v. microsimulatie, is gewenst.

6. Conclusies

De invloed van de wegvaklengte op de capaciteit blijkt bij tweestrooks wegvakken fors. De positieve invloed van de invoegende stroom is opvallend. Op basis van deze twee variabelen is een eenvoudig verklarend model verkregen voor de capaciteit op tweestrooks autosnelwegen.

Voor wat betreft het vrachtverkeer: op tweestrooks wegvakken lijkt een pae-factor 1,75 te hoog. Uit dit onderzoek blijkt 1,5 een betere waarde te zijn, in combinatie met de gevonden capaciteitsformule.

De interessante puzzel dient zich nu aan om de bevindingen door te vertalen naar capaciteitsregels die bruikbaar zijn voor verkeersmodellen. De aan de hand van dit onderzoek opgestelde capaciteitsformule voor tweestrooks wegen wordt op dit moment getest in het LMS en dit geeft dus een interessante testcase. Voor driestrooks wegen waren er te weinig onderzoekslocaties voorhanden om definitieve conclusies te trekken. Het boeiendst is hier het nieuwe inzicht over de (geringe) doorwerking van het vrachtverkeer.

Advies voor verder onderzoek

Een empirisch onderzoek, maar toch beginnen we met twee aanbevelingen aangaande het concept 'capaciteit':

- Een algemeen aanvaard denkconcept is dat 'capaciteit' een wegkenmerk is dat kan worden gehecht aan een wegdoorsnede. M.a.w. als een rechtstand van 1 km een capaciteit C heeft die verder niet beïnvloed wordt door turbulentie, dan heeft de opeenvolging van tien van zulke rechtstanden nog steeds een capaciteit C. De praktijk weerspreekt dit, en ook is beargumenteerd dat de anticipatie van de weggebruiker het aannemelijk maakt dat er een lengte-effect moet zijn. Wij achten het van belang dat dit idee wordt geïncorporeerd in de theorievorming aangaande de capaciteit van wegen. Het is immers van groot praktisch belang te weten dat een lang wegvak minder capaciteit bezit dan een kort wegvak.
- Het vrachtverkeer wordt doorgaans verrekend met een personenauto-equivalent, de pae-factor. Voor driestroomsrijbanen gaat dit niet op. Als personen- en vrachtauto's nog maar slecht mengen, ontwikkelen zich ook gescheiden capaciteiten voor beide groepen. Hoe dit echt zit, hoe het met wegvaklengte te maken heeft, laat staan hoe dit in rekenregels moet worden gevangen, is nog een open boek. Ons advies is dan ook hieromtrent nieuwe conceptvorming te ontwikkelen.

Aangaande het verrichte onderzoek stellen we vast dat het bescheiden beschikbare materiaal al nuttige aanwijzingen heeft opgeleverd om de rekenregels voor capaciteiten te herzien. Door de analyse te herhalen onder vergroting van het aantal onderzoekslocaties en verbetering van de nauwkeurigheid waarmee de veldwaarde van de capaciteit bepaald is, kunnen scherpere verbanden gevonden worden. Daarnaast kunnen de vraagtekens die nu nog voor wegvakken met drie of meer rijstroken resteren, worden weggewerkt.

Enkele ideeën hiervoor:

Vergroting van het aantal punten kan gerealiseerd worden door ook naar andere jaren te kijken. Dan komen andere locaties in beeld, bijv knelpunten die nu al zijn opgelost of knelpunten die er nu zijn en in 2010 niet. De nauwkeurigheid kan verbeterd worden door capaciteiten op losse dagen te bepalen in plaats van op jaargemiddelde cijfers (hoewel voor het LMS/NRM lijkt dit goed genoeg, er wordt immers met gemiddelden gerekend).

Door losse dagen te gebruiken kan ook het aantal geschikte onderzoekslocaties toenemen. Locaties die in het jaargemiddelde worden verstoord door fileterugslag, zijn op losse dagen (dagen waarop er geen verstoring van de meting is door fileterugslag) mogelijk wel bruikbaar.

Het effect van weefvakken op de capaciteit is niet onderzocht. Voor de toepassing van de capaciteit op tweestrooms wegvakken is dit geen probleem. Er is dan immers (vrijwel) nooit sprake van een weefvak. Voor een consistente modellering van de capaciteit van drie- en meerstrooms rijbanen is het wel belangrijk dit effect mee te nemen.

Referenties:

- 1) PAE-waarde van vrachtverkeer in relatie tot wegcapaciteit, Transpute i.o.v. RWS-DVS, mei 2010
- 2) Filegolven, lopende golven van fileverkeer op snelwegen, Transpute i.o.v. RWS-DVS, maart 2008
- 3) Capaciteitsgedrag in bottlenecks, Transpute i.o.v. RWS-AVV, januari 2000
- 4) Handboek Capaciteit Infrastructuur Autosnelwegen (CIA), RWS-WVL, diverse uitgaven, alsmede het voor CIA uitgevoerde onderbouwende onderzoek.